

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
НАУЧНО-ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР
«НАДЕЖНОСТЬ И РЕСУРС БОЛЬШИХ СИСТЕМ И МАШИН»
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ФГБУН НИЦ «НИР БСМ» УрО РАН)

УДК 614.8-027.21:519.2 504:519.2
Рег. № НИОКТР АААА-А19-119021590030-7



УТВЕРЖДАЮ
Директор НИЦ «НИР БСМ» УрО РАН

Л.В. Полуян

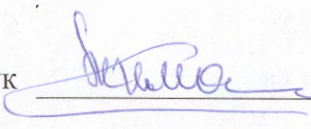
«23» декабря 2019 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

РАЗРАБОТКА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОСНОВ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ
КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ИНФРАСТРУКТУР ПО КРИТЕРИЮ ИНТЕГРАЛЬНОГО
РИСКА

(промежуточный)
(№ 0407-2019-0001)

Руководитель НИР,
Научный руководитель НИЦ УрО
РАН, глав. науч. сотр., д-р техн. наук


С.А. Тимашев

Екатеринбург 2019

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, науч. рук.,
глав. науч. сотр., д-р техн. наук

С.А. Тимашев
(введение, разделы 1.1, 2, 3,
4, 7.2, заключение)

(подпись, дата)

Исполнители:

Директор, канд. техн. наук

Л.В. Полуян
(разделы 1.3, 7.3,
Приложение А)

(подпись, дата)

Уч. секретарь, канд. техн. наук

Е.С. Гурьев
(раздел 1.3)

(подпись, дата)

Вед. науч. сотр., канд. техн. наук

А.В. Бушинская
(разделы 2, 3, 4, 7.2)

(подпись, дата)

Вед. науч. сотр., д-р техн. наук

В.П. Обоскалов
(раздел 4)

(подпись, дата)

Вед. науч. сотр., д-р техн. наук

А.Н. Тырсин
(раздел 1.2)

(подпись, дата)

Стар. науч. сотр., канд. техн. наук

М.Г. Малюкова
(раздел 1.3)

(подпись, дата)

Стар. науч. сотр., канд. техн. наук

В.Н. Алехин
(раздел 1.1)

(подпись, дата)

Стар. науч. сотр., д-р техн. наук

А.О. Чернявский
(раздел 6)

(подпись, дата)

Стар. науч. сотр., д-р техн. наук

Ю.В. Рождественский
(раздел 5)

(подпись, дата)

Вед. инженер-исслед., б. с.

И.Г. Никулина
(раздел 1.1)

(подпись, дата)

Стар. инженер-исслед., б. с.

Т.Г. Ковальчук
(раздел 1.1)

(подпись, дата)

Инженер-исслед., б. с.

И.М. Симагин
(раздел 1.3)

(подпись, дата)

Инженер-исслед., б. с.

В.В. Чикир
(раздел 1.3)

(подпись, дата)

Нормоконтроль, инженер

Ф.В. Пономарева

(подпись, дата)

РЕФЕРАТ

Отчет 337 с., 1 кн., 118 рис., 20 табл., 240 источ.

РЕГИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР, СИСТЕМЫ УМНЫХ КРИТИЧНЫХ ИНФРАСТРУКТУР, ТЕХНОГЕННЫЕ, ПРИРОДНЫЕ РИСКИ, ЖИВУЧЕСТЬ, МЕЙНТЕНАНС, КОНВЕРГЕНТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Объектом исследования являются взаимозависимые критичные инфраструктуры различной природы (умные, устойчивые к развитию региональные и урбанистические системы жизнеобеспечения и производства, арктические электроэнергетические системы, космические аппараты, атомные реакторы), функционирующие в обычных условиях и ЧС.

Цель работы – создание гибкого многоцелевого инструментария для гармоничного управления и оптимизации живучести и безопасности цифровых систем критичных взаимозависимых инфраструктур по обобщенным территориальным критериям.

Методы проведения работы: конвергентная технология MAICS (цифровая стохастическая механика, искусственный интеллект, теория информации, когнитивные и социальные науки).

В результате НИР разработаны:

- концепция, методология и основные компоненты стратегической технологии трансформации регионов/городов в *супраживучие* умные территории/города;
- методы диагностики, мониторинга, моделирования состояния и устойчивого развития социальных инфраструктур на основе векторной энтропии;
- методы, позволяющие количественно оценить сокращение средней ожидаемой продолжительности жизни местного населения (города, региона или страны) от гибели людей при техногенных и/или природных авариях и катастрофах;
- метод оценки индивидуальной надежности уникальных изделий ракетно-космической техники на стадии их проектирования, изготовления и эксплуатации;
- методические основы расчета надежности локальных гибридных арктических ЭЭС, имеющих в своем составе возобновляемые источники энергии;
- подход к анализу возможных механизмов достижения предельных состояний (накопление перемещений, малоцикловая усталость) при взаимодействии конструкции реактора с жидкометаллическим теплоносителем.

Разработанная методология относится к зонтичной науке инфранетике и органично увязывает между собой результаты теории сооружений, механики разрушения, риск-анализа, теории оптимизации, демографии и макроэкономики, когнитивных и социальных наук, а также наук, которые определяют специфику конкретного региона.

Область применения – поддержка и принятие решений лицами отраслевого, регионального и муниципального уровня, связанных с эффективным функционированием территориальных инфраструктур в контексте обеспечения социально-экономических нужд и параметров жизни регионального социума.

Предлагаемая стратегия управления регионом/городом (*говернанса*) представляет собой предсказательный менеджмент, который позволяет придать региону/городу новое инновационное измерение, позволяющее: решить задачу непрерывного роста ВВП с одновременным повышением благосостояния его жителей и роста производства товаров и услуг; сохранить и увеличить достигнутую региональную среднюю продолжительность жизни в добром здравии; минимизировать расходы на безопасность региона. Результаты исследования позволяют повысить техногенную, урбанистическую, экологическую и продовольственную безопасность региона/города, а также минимизировать последствия ЧС, в том числе, катастроф по типу «*черный лебедь*» (редчайших, (не)прогнозируемых, но с катастрофическими последствиями).

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	9
ВВЕДЕНИЕ	13
1 Первая версия базовой математической конвергентной модели системы взаимозависимых урбанистических критичных инфраструктур (в том числе вероятностно-энтропийные алгоритмы их диагностики, мониторинга, живучести и безопасности) как основы для построения модели виртуального умного города/региона	15
1.1 Концепция, методология и основные компоненты технологии трансформации регионов страны в супраживучие умные территории/города.....	15
1.1.1 Введение	16
1.1.2 Глобальный экзистенциальный фон и основные тенденции развития мировой цивилизации	16
1.1.3 Краткое описание критичных инфраструктур.....	22
1.1.4 Живучесть региональных критических инфраструктур и территорий: современная концепция	24
1.1.5 Супраживучесть региональных критических инфраструктур	28
1.1.6 Источники региональной супраживучести	29
1.1.7 Анализ взаимозависимости критических инфраструктур.....	30
1.1.8 Инфранетика: инструментарий для разработки стратегии управления региональными рисками	32
1.1.9 Характеристика региона как системы систем критичных инфраструктур	35
1.1.10 Предлагаемое решение проблемы трансформации Иссык-Кульского района в супраживучую территорию	35
1.1.11 Ключевые особенности программно-аппаратного комплекса ЖИБУР (живучесть и безопасность умного региона)	37
1.1.12 Концепция построения супраживучего умного Иссык-Кульского региона Республики Кыргызстан	40
1.1.13 Потенциальные потребители платформы ПАК ЖИБУР	49
1.1.14 Выгоды от применения ПАК ЖИБУР	50
1.1.15 Заключение к разделу 1.1	51
1.2 Разработка методов мониторинга состояния инфраструктур на основе векторной энтропии	53
1.2.1 Энтропийное моделирование стохастических систем.....	53

1.2.2	Векторная энтропийная модель мониторинга и управления многомерными стохастическими системами.....	57
1.2.2.1	Векторное представление энтропии как диагностическая модель сложной стохастической системы	57
1.2.2.2	Мониторинг состояния многомерных стохастических систем на основе векторного представления энтропии	64
1.2.3	Векторное энтропийное моделирование устойчивого развития городов	70
1.3	Человеческий фактор в критичных инфраструктурах	85
1.3.1	Методологические подходы к оценке ЧФ в управлении безопасностью критичными инфраструктурами	85
1.3.2	Методика оценки человеческого фактора в критичных инфраструктурах	109
1.3.3	Оценка функций риска, надежности и вероятности ошибки человека.....	114
2	Алгоритм и расчеты демографических констант для различных регионов и территорий страны на основе таблиц дожития и учета последствий техногенных и/или природных инцидентов (число, гендерный состав, возраст и уровень образования/компетенции жертв аварий и катастроф).....	132
2.1	Введение	132
2.2	Необходимые теоретические сведения из макроэкономики и демографии	133
2.2.1	Основы теории дисконтирования	133
2.2.2	Функция полезности (всей) жизни	137
2.2.3	Социальная ставка дисконтирования	139
2.2.4	Основы современной демографии и теории выживаемости	141
2.2.5	Закон смертности Гомперца-Мейкхема	145
2.2.6	Оценка параметров закона.....	147
2.2.7	Оценка остаточного времени жизни.....	148
2.2.8	Таблицы смертности/дожития.....	149
2.3	Индекс качества жизни (life quality index)	153
2.4	Стоимость статистической жизни и готовность платить	159
2.5	Стоимость спасения жизни (life saving cost).....	165
2.6	Влияние на среднюю ожидаемую продолжительность жизни внезапной гибели людей	166
2.6.1	Оценка влияния внезапной гибели людей на интенсивность смертности и относительное изменение СОПЖ с помощью закона Гомперца-Мейкхема.....	166
2.6.2	Оценка влияния внезапной гибели людей на параметры таблиц смертности	169
2.7	Выводы к разделу 2	187

3	Алгоритм, использующий конвергентную MAICS-технологию оценки индивидуальной надежности уникальных конструкций на стадии их проектирования, изготовления и эксплуатации на основе метода, разработанного в НИЦ УрО РАН (применительно к изделиям ракетно-космической техники, перспективным атомным реакторам на свинцовом теплоносителе, уникальным высотным зданиям)	188
3.1	Введение. Особенности методологии оценки индивидуальной конструкционной надежности.....	188
3.2	Основные положения теории индивидуальной конструкционной надежности	191
3.3	Основные схемы расчета индивидуальной конструкционной надежности деформируемых систем	194
3.4	Применение теории индивидуальной конструкционной надежности к анализу надежности поворотной штанги уникальных конструкций (УК).....	203
3.5	Особенности построения ФПС и ДО в рамках теории индивидуальной конструкционной надежности.....	209
3.6	Технология применения методологии индивидуальной конструкционной надежности.....	211
3.7	Общий алгоритм применения процедуры оценки индивидуальной конструкционной надежности УК на этапе его эксплуатации	221
3.8	Выводы к разделу 3	223
4	Математическая модель анализа и оценки надежности локальных и автономных ЭЭС с распределенной генерацией (в том числе, с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) – солнечными батареями, ветрогенераторами и др.) применительно к условиям арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ).....	224
4.1	Гибридные энергетические объекты (ГЭО) арктической зоны РФ.....	224
4.2	Перспективные накопители энергии для ВИЭ.....	226
4.3	Вероятностное эквивалентирование при расчетах структурной надежности ЭЭС	229
4.4	Оценка вероятностных параметров дефицита мощности локальной арктической объединенной ЭЭС.....	241
4.5	Заключение к разделу 4.....	243
5	Исследование реологических свойств смазочных, в том числе биоразлагаемых, материалов, работающих, в том числе, при сверхнизких отрицательных температурах (до –150 град. Цельсия)	244
5.1	Создание смазочных композиций, обеспечивающих надежную работу узлов трения машин и механизмов в условиях Крайнего Севера и Арктики	244

6	Анализ возможных механизмов достижения предельных состояний (накопление перемещений, малоцикловая усталость) при взаимодействии конструкции реактора с жидкометаллическим теплоносителем.....	247
6.1	Введение.....	247
6.2	Возможность ускорения расчетов стабильных циклов.....	249
6.2.1	Оценка предельной нагрузки.....	249
6.2.2	Оценка параметров стабильного цикла. Накопление повреждений.....	251
6.3	Возможность смены механизма деформирования при монотонном изменении параметра нагрузки.....	256
6.3.1	Цилиндрическая оболочка при циклических изменениях уровня теплоносителя....	256
6.3.2	Круглая пластина, нагруженная движущимся по радиусу тепловым полем.....	258
6.3.3	Образец Коффина для испытаний на термоусталость.....	260
6.4	Заключение к разделу 6.....	263
7	Моделирование эколого-экономических сценариев пространственного развития арктических регионов России.....	264
7.1	Введение.....	264
7.2	Этап 2, а) разработка математических моделей функционирования гибридных энергетических объектов (ГЭО).....	267
7.2.1	Обобщенная вероятностная модель ВКИ в виде сетевого потока.....	267
7.2.2	Формулировка оптимизационной задачи.....	270
7.2.3	Пример вероятностного анализа локальной инфраструктуры транспортного типа.....	271
7.3	Этап 2, б) построение математических моделей прогнозирования возможных последствий пожаров и взрывов и развития каскадных аварий на топливно-энергетических потенциально опасных объектах.....	276
7.3.1	Краткая характеристика сжиженного природного газа.....	277
7.3.2	Моделирование процессов растекания и испарения сжиженного природного газа (СПГ).....	278
7.3.4	Формирование и рассеяние в атмосфере газовых облаков, образующихся при проливах СПГ.....	283
7.3.5	Оценка зон поражения в программных комплексах TOXI+RISK И ALOHA.....	289
7.3.6	Оценка зон поражения при авариях на ПОО с СПГ в ПК TOXI+RISK и ALOHA..	294
7.3.7	Оценка каскадного развития аварий.....	300
7.3.8	Моделирование каскадных аварий и графическое построение визуальных моделей зон поражения.....	306
7.4	Заключение к разделу 7.....	309

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	312
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	316
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ.....	336

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ПАК - программно-аппаратный комплекс
- ЖИБУР - Живучесть и Безопасность Умного Региона
- СЧИС - Социум – Человек – Критичная инфраструктура – Среда
- РВП - Региональный валовый продукт
- РСКИ - Региональная система критичных инфраструктур
- РСЖ - Региональные (и городские) системы живучести
- УР - Умный регион
- ВСКИ - Взаимозависимые системы критических инфраструктур
- РИКЖ - Региональный индекс качества жизни
- СКС (SaaS) - Софт как сервис
- ИКР - Иссык-Кульский регион
- АТС - Автономные транспортные средства
- ВКИ – Взаимозависимые критичные инфраструктуры
- СТО - Социально-технологический объект
- КИ - Критичная инфраструктура
- СОПЖ - Средняя ожидаемая продолжительность жизни
- ЛПР - Лица, принимающие решения
- ВВП - Внутренний валовый продукт
- СПП - Социальная готовность платить
- ИКЖ - Индекс качества жизни
- Г-М - Гомперца-Мейкхема
- ЦСЖ - Цена среднестатистической жизни
- ПОО - Потенциально опасный объект
- ФПВ - Функция плотности вероятности
- ИФР - Интегральная функция распределения
- СЦСЖ - Социальная цена статистической жизни
- СИКЖ - Социальный индекс качества жизни
- ГП - Готовность платить
- СПП - Социальная готовность платить
- ГУ - Граничное условие
- ССЖ - Стоимость спасения жизни
- ТС - Таблица смертности

ВО - Вероятность отказа

ТИКН - Теория индивидуальной конструкционной надежности

ГС - Генеральная совокупность

УК - Уникальные конструкции

ДО - Допустимая область

ФПС - Функция предельного состояния

ФПВ - Функция плотности вероятности

ТЗ - Техническое задание

СВ - Случайная величина

СФ - Случайная функция

CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) - Когнитивная надежность и метод анализа ошибок

ЕНЕА (Emergency Human Error Analysis) - Гибридная модель анализа вероятности человеческой ошибки

HCR (Human Cognitive Reliability) - Когнитивная надежность человека

HEs (Human Errors) - Человеческие ошибки (ЧО)

HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique) - Методика оценки и сокращения ошибок человека

HEFFR (Human Error and Functional Failure Reasoning) - Метод оценки человеческой ошибки и функциональной несостоятельности

HEP (Human Error Probability) - Вероятность человеческой ошибки

HF (Human factors) - Человеческие факторы (ЧФ)

HF/E (Human factors and ergonomics) – Человеческие факторы и эргономика

HTA (Hierarchical Task Analysis) - Иерархический анализ задач

HRA (Human Reliability Analysis) - Анализ надежности человека

PSA (Probabilistic Safety Analysis) - Вероятностный анализ безопасности

PSFs (Performance Shaping Factors) - Факторы формирования производительности

PRA (Probabilistic Risk Assessment) - Вероятностная оценка риска

SHERPA (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach) - Систематический подход к уменьшению и прогнозированию человеческой ошибки

SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk Human Reliability Assessment) - Стандартизованная оценка анализа риска надежности человека на предприятии

TD-R (Task Demands-Resources) - Метод «Требования к задаче – ресурсы»

THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) - методика прогнозирования частоты ЧО

TRACEr (Technique for Retrospective and Predictive Analysis of Cognitive Errors) -
Метод ретроспективы и прогностического анализа когнитивных ошибок

TRACEr-OGI (Technique for the Retrospective and Predictive Analysis of Cognitive
Errors for the Oil and Gas Industry) - Методика ретроспективного и прогностического
анализа когнитивных ошибок для нефтегазовой промышленности

RF (Reliability Factor) - Фактор надежности человека

ИИ - Искусственный интеллект

АЗРФ - Арктическая зона Российской Федерации

ЭЭС - Электроэнергетическая система

ГЭО - Гибридные энергетические объекты

ГЛЭС - Гибридные локальные энергетические системы

МО - Математическое ожидание

ВИЭ - Возобновляемые источники энергии

КЗ - Короткое замыкание

ОТКЗ - Отказ типа «короткое замыкание»

ПСН - Показатели структурной надежности

ПН – Показатели надежности

ПК - Программный комплекс

ВЭ - Вероятностное эквивалентирование

ИП - Источник питания

СН - Структурная надежность

КН – Коэффициенты неготовности

КГ - Коэффициенты готовности

ПЦ - Последовательная цепь

ММС - Метод минимальных сечений

МС - Минимальные сечения

ВП - Вероятностное преобразование

ДЭ - Декомпозиция элемента

СЭС – Системы электроснабжения

ОЭС - Объединенные энергосистемы

БН - Балансовая надежность

ОЛЭС - Объединенные локальные энергосистемы

ВСКИ - Взаимозависимая система критичных инфраструктур

ПОО - Потенциально опасный объект

СПГ - Сжиженный природный газ

ТВС - Топливо-воздушная смесь

ОВ - Опасное вещество

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние решаемой в данном отчете научно-технической проблемы (*Разработка фундаментальных основ управления и защиты критически важных инфраструктур по критерию интегрального риска*) в мире можно охарактеризовать как начальное и *лоскутное*. Несмотря на большое количество публикаций на эту тему, за ними не просматривается сколь-нибудь целостная картина анализа проблемы и возможные пути ее практического разрешения. Это объясняется тем, что сама проблема чрезвычайно динамичная, быстро трансформируется и скачкообразно меняется, в зависимости от развития передовых технологий.

Из наблюдаемых четырех глобальных тенденций: (1) цифровизация, (2) урбанизация, (3) мобильность, (4) увеличение продолжительности жизни в добром здравии, самыми крупномасштабными сдвигами характеризуется *глобальная цифровизация*. Она привела к появлению квантовых суперкомпьютеров, Интернета вещей, автоматизации, роботизации, ускоренному вымыванию профессий среднего класса, росту принципиальной неопределенности современного мира, появлению ранее не встречавшихся рисков типа «*черный лебедь*» и росту величины ущерба от аварий и катастроф. Этот экзистенциальный фон мировой цивилизации создает императив лицам, принимающим решения на уровне *регионов* (ЛПРр): необходимо учитывать по существу перечисленные выше мировые тенденции при планировании и осуществлении своей деятельности для обеспечения позитивной перспективы социально-экономического развития своего региона.

В данной работе, *по-видимому, впервые в мировой практике*, для этой цели используется новая конвергентная технологии MAICS (цифровая стохастическая механика, искусственный интеллект, теория информации, когнитивные и социальные науки) в рамках зонтичной науки инфранетики. В отчете приведены результаты холистических исследований полученные на ее основе. Эти результаты органически связаны с другими научно-исследовательскими работами, проведенными НИЦ УрО РАН ранее.

Выбор объектов исследования – взаимозависимые критичные инфраструктуры различной природы (живучие, умные, устойчивые к развитию *региональные* и *урбанистические системы* жизнеобеспечения и производства, *арктические электроэнергетические системы* с ВИЭ, *космические аппараты, атомные реакторы нового типа, трибоузлы машин* и механизмов для Крайнего Севера, АЗРФ и космоса, функционирующие в обычных условиях и ЧС), *предопределен спецификой* и

потребностями промышленности и жизнеобеспечения Уральского Федерального округа (УрФО) в 21-м веке и отвечают на вызовы современного мира процветанию и существованию России.

Данное инновационное исследование является актуальным и прорывным, поскольку оно направлено на создание гибкого многоцелевого инструментария для гармоничного менеджмента территориями на основе оптимального управления системами систем взаимозависимых региональных инфраструктур с учетом человеческого фактора по обобщенным территориальным социально- макроэкономическим критериям.

Все исходные данные для разработки соответствующих разделов темы, в том числе результаты патентных исследований и выводы из них, сведения о метрологическом обеспечении НИР (в случаях их необходимости), приведены в соответствующих публикациях, список которых приведен в конце отчета.

Данный отчет по НИР является промежуточным. В связи с этим цели и задачи исследований и их место в выполнении отчета представлены перед каждым разделом отчета.

1 Первая версия базовой математической конвергентной модели системы взаимосвязанных урбанистических критичных инфраструктур (в том числе вероятностно-энтропийные алгоритмы их диагностики, мониторинга, живучести и безопасности) как основы для построения модели виртуального умного города/региона

1.1 Концепция, методология и основные компоненты технологии трансформации регионов страны в супраживучие умные территории/города

В данном разделе на примере Иссyk-Кульской области республики Кыргызстан (рисунок 1.1.1) представлена технология трансформации регионов/городов страны в супраживучие умные территории¹.



Рисунок 1.1.1 – Административное деление Республики Кыргызстан

¹ Данная работа выполнена в рамках Указа Президента Республики Кыргызстан *Сооронбая Жээнбекова* от 11 января 2019 г. УП № 1 «Об объявлении 2019 года Годом развития регионов и цифровизации страны» и представлена в виде доклада на III Международном круглом столе «Биологическая и продовольственная безопасность, экология и современные цифровые технологии» в г. Бишкек, Кыргызстан, 16–17 сентября 2019 г.

1.1.1 Введение

Руководители регионов стран во всем мире сталкиваются с всевозрастающей проблемой обеспечения благополучия своих территорий, городов и общин в связи с ростом широкого спектра природных и техногенных угроз (землетрясения, сели, наводнения, ураганы, засухи, загазованность, промышленные аварии и катастрофы, социальная напряженность, террористическая деятельность и т.п.). Как добиться заявляемой цели – сделать свои регионы инклюзивными, безопасными, живучими и устойчивыми к развитию, что позволит им стать умными? В данной работе сделана попытка ответить позитивно на эти вопросы применительно к Иссык-Кульской области республики Кыргызстан с позиций конвергентной технологии МАИКС и основанной на ней *зонтичной* науки инфранетики. Начнем с краткого описания основных трендов мировой цивилизации и как в них вписывается современный Кыргызстан.

1.1.2 Глобальный экзистенциальный фон и основные тенденции развития мировой цивилизации

За последние годы наблюдаются тектонические сдвиги в мире во всех областях человеческого существования. Видимое ускорение научно-технического прогресса: (появление первых квантовых компьютеров, которые в сотни миллионов раз быстрее современных суперкомпьютеров, что открывает прямой путь к созданию сверхума и успешные эксперименты по телепортации микрочастиц), рост числа экономических вызовов и обострение конкуренции на мировой сцене, возникновение ранее не существовавших техногенных и социально-общественных угроз. Социальные сети общего (ВКонтакте, Facebook, Twitter, Instagram) пользования, по сути – специального вида инфраструктуры – охватили уже миллиарды людей, и позволили практически мгновенную мобилизацию огромных масс людей на осуществление социальных идей не обязательно позитивной направленности. В это же время инфраструктуры специального назначения (LinkedIn, ResearchGate, Mendeley) позволяют создавать виртуальные научные коллективы, члены которых успешно работают на разных континентах мира.

Глобальное потепление стало общепризнанным научно доказанным фактом. Ускоряется мировая урбанизация: В 2018 г. 51% мирового населения проживало в городах. К 2050 г. 70% населения планеты будут горожанами, при этом наблюдается глобальная тенденция смещения человеческих масс с севера на юг, где тепло, много солнца и

разнообразнее биомасса. Север теряет население. Фонд Рокфеллера в 2013 г. выступил с инициативой и финансовой поддержкой для создания 100 живучих городов мира.

В 2015 г. запущен проект возрождения «Великого шелкового пути» с реализацией глобального инфраструктурного проекта «Один пояс – один путь» (Китай). Часть этого пути всегда проходила через территорию современного Кыргызстана [1]. Разрабатывается трансконтинентальный транспортный коридор Север-Юг (Россия-Азербайджан-Иран-Индия) и межрегиональный проект железной дороги «Хоккайдо-Сахалин-Дальний Восток России» (Япония-Россия).

Многие региональные бюджеты по разным причинам продолжают сокращаться (относительно реальных потребностей, которые зачастую растут быстрее региональных возможностей), что лишает регионы финансовых и квалифицированных человеческих ресурсов. Катастрофические события «один раз в сто/тысячу и даже миллион лет» фактически происходят гораздо чаще. Сочетание этих двух факторов оказывает огромное давление на регионы и города; часто они осознаются только тогда, когда происходит что-то непоправимое. Резко увеличилось как позитивная энтропия роста, так и негативная энтропия деградации человеческой цивилизации, причем непонятно, что растет быстрее.

Появление технологий следующего поколения неоспоримо свидетельствует о переходе человечества к новому, четвертому укладу, в котором наука явится основным инструментом решения всех возникающих проблем, и, одновременно, источником новых рисков планетарного масштаба. Наблюдается ускоренный рост всех форм эпистемных (принципиально неудаляемых) и алеаторных неопределенностей, и связанных с ними рисков; повышение роли человеческого фактора (как индивидуального, так и коллективного) в возникновении аварий и катастроф, в том числе катастрофы по типу «черный лебедь». «Черный лебедь» – это событие, обладающее следующими свойствами: оно аномально и потому мало предсказуемо, обладает огромной (относительной) силой воздействия; человеческая природа заставляет нас придумывать пост-фактум объяснения случившемуся, делая шоковое событие объяснимым и предсказуемым.

Среди ряда представителей общественных наук наблюдается слепота по отношению к случайности, особенно, крупномасштабной. В их работах вероятность «черных лебедей» исключена как таковая, хотя логика «черного лебедя» делает то, чего мы не знаем, гораздо более важным, чем то, что мы знаем (не знаем, что мы не знаем).

Стоимость ликвидации природных и техногенных катастроф стала превышать годовой прирост ВВП стран некоторых регионов Земли. В России ежегодный экономический ущерб от ухудшения экологической обстановки составляет 4-6% ВВП и имеют тенденцию к росту (Российская Газета 05 июня 2013 г. №119). По мнению акад. С.

Глазьева, если годовой прирост ВВП не превышает 2%, то развитие страны топчется на месте – весь прирост ВВП расходуется на «латание» последствий аварий и катастроф. Поэтому современный способ подсчета ВВП безнадежно устарел.

Семимильными шагами развивается биология (в том числе, ее прикладные разделы – животноводство и растениеводство) и геновая инженерия. Только моральные скрепы не позволяют (пока) человечеству начать разрабатывать технологию создания «людей из пробирки». Достижения медицины позволяют прогнозировать скорую победу над всеми (существующими) болезнями и достижения практического бессмертия, которое, однако, сможет себе позволить только 0.1 процента населения «золотого миллиарда». Одновременно наблюдается стагнация и уменьшение численности среднего класса. Неумолимо надвигается глобальная катастрофа-расслоение населения на бедных и (сверх) богатых, что чревато социальными потрясениями мирового масштаба в ближайшем историческом будущем.

Из наблюдаемых четырех глобальных тенденций: (1) цифровизация (Big Data); (2) урбанизация; (3) мобильность; (4) увеличение продолжительности жизни в добром здравии, самыми крупномасштабными сдвигами характеризуется глобальная цифровизация.

Глобализация характеризуется активной интернетизацией транспорта, энергетики, строительства, ЖКХ, медицины, образования, а также всех отраслей сельского хозяйства. Она привела к появлению *локального интернета* (предприятия) – симбиоза последних достижений микроэлектроники, компьютерной техники, искусственного интеллекта и цифровой технологии. В результате этого возник Интернет вещей (ИВ – IoT) или интернет-индустрия, *базовой инфраструктурой* которой становится интернет-цифровая платформа, которая обеспечивает эффективное взаимодействие всех объектов промышленного (и сельскохозяйственного) производства на основе Интернета. Одновременно с этим были разработано множество специализированных платформ для обеспечения взаимовыгодного взаимодействия между производителями и потребителями в широком смысле этих слов. Так родилась платформенная модель бизнеса, которая упразднила посредников в бизнесе. Частным случаем этого стала так называемая *блокчейн технология*, изначально предназначавшаяся для надежного учета активов и операций с ними. Она становится надежной экономической оболочкой в сети Интернет, обслуживающей онлайн платежи, обмен активами, выпуск и исполнение умных контрактов. В связи с этим возникла и новая прикладная наука количественной оценки уровня доверия к человеку (theory of trust).

Цифровизация позволила реализоваться идее *цифровых двойников*, когда стало возможным наряду с физическими (реальными) технологиями производства и эксплуатации изделий создать их цифровые двойники с целью обеспечения их надежности и безопасности (к примеру, так был создан президентский автомобиль «Аурус» для Президента РФ В.В. Путина).

Развитие всеобщей цифровизации имеет и свою негативную сторону. Согласно теории больших систем, чем сложнее система (в нашем случае, регион, который в ходе цифровизации приобретает все большее число умных сервисов), тем она более уязвима по отношению к внешним и внутренним воздействиям, нагрузкам и стрессорам. По мере «поумнения» регион будет становиться все более *сложной системой систем*. При этом каждая служба региона, сама по себе, является *критичной инфраструктурой*, так как без ее нормального функционирования эффективность всего региона будет под угрозой.

В ходе цифровизации всех социальных структур и служб региона и его экономики, они будут постепенно превращаться во все более сложные автоматизированные инфраструктурные системы, всецело зависящие от бесперебойного потока информации, ее обработки в реальном масштабе времени и своевременного принятия научно-обоснованных решений. Цифровизация региона будет неизбежно сопровождаться ростом *уязвимости* этих взаимозависимых критичных инфраструктур, масштаба хаоса и величины ущерба от неизбежных аварий и катастроф, в том числе, каскадного типа. В результате могут возникнуть такие новые угрозы как:

- резкое усложнение региональной системы инфраструктур и неизбежный рост энтропии хаоса,
- появление новых типов каскадных аварий, связанных с:
 - нарушением непрерывности или искажением потока информации,
 - прерыванием снабжения продуктами (материальными компонентами) цепочки взаимозависимых сервисов, необходимых для бесперебойного их функционирования,
 - прерыванием снабжения сервисами (в том числе, электроэнергией, водой, тепла) взаимозависимых инфраструктур;
- усиление ущербов от сельскохозяйственных, биологических, промышленных и транспортных (в том числе, каскадных) аварий, происходящих в «умной среде»,
- появление синергетических отказов (одновременное появление нескольких независимых инцидентов),
- возможные проявления социальной напряженности из-за сложности идентификации места и размера бедствия и достоверных и полных оценок всех

его материальных и социальных последствий.

Цифровизация сама по себе не способна ликвидировать эти угрозы, она для этого вообще не предназначена и может только создавать новые, ранее не существовавшие риски. Необходимо до или в ходе цифровизации придать уже существующим и вновь создаваемым компонентам инфраструктуры свойства живучести при их функционировании в условиях постоянно обновляемой среды.

Появились новые формы экономического и промышленного шпионажа (hacking-хакинг), стратегической разведки (phishing-фишинг), маскировки и увода транспортных средств (автомобилей, судов) от правильного маршрута с помощью систем GPS (spoofing-спуфинг). С помощью малвера (вредоносной программы) stuxnet осуществлена первая успешная кибератака – реальное физическое повреждение центрифуг, используемых Ираном для обогащения урана 235. Ответом на этот вызов стало создание теории *кибербезопасности инфраструктур*.

Создание всеобъемлющей, но невидимой вычислительной сети (ambient computing) всей ноосферы создает предпосылки к тому, что в ближайшем будущем ею начнет управлять сверхразум – искусственный интеллект, превосходящий человеческий в невообразимое число раз.

Описанный выше экзистенциальный фон мировой цивилизации объективно показывает, что лицам, принимающим решения на уровне регионов (ЛПРр), необходимо учитывать перечисленные выше мировые тенденции при планировании своей деятельности и для позитивной дальней перспективы развития своего региона.

В условиях, когда способность общества предотвратить гибель людей и ухудшение качества окружающей среды конечна и ограничена его способностью создавать общественное богатство, глобальной проблемой, требующей своего решения, является минимизация территориального, регионального ущерба путем оптимизации распределения (объема, места и времени приложения) всегда ограниченных ресурсов на нужды безопасности. Это эквивалентно уменьшению интегральных последствий аварий и катастроф за счет применения всей гаммы методов и средств защиты от вновь возникающих, в том числе, климатических и возможных социально-экономических угроз.

Все перечисленное выше кардинальным образом меняет все парадигмы развития современных фундаментальных, прикладных и инженерных наук, связанных с техническим прогрессом. Действительно, аддитивная 3D технология меняет наши представления о сути материаловедения, если материал «образуется», а конструкция создается в едином по времени технологическом цикле принтера. Диагностика материалов, конструкций, изделий, и сооружений, созданных по технологии 3D

становится интегральной частью этих систем; мониторинг осуществляется с помощью встроенных в систему беспроводных датчиков и аккумулируется в «облаке», где производятся все вычисления и анализ больших накопленных данных, а где это невозможно/невыгодно – с помощью роботов, беспилотных интеллектуальных дронов или автоматизированных судов. Мейнтенанс (техническое обслуживание и ремонт) в ближайшем будущем будет производиться с помощью умных роботов. Цифровизация позволяет создавать цифровых двойников (или близких родственников) проектируемых или эксплуатируемых объектов и отслеживать в реальном масштабе времени поведение реального объекта и его двойника и на основе выявляемых рассогласований их технических параметров судить о его состоянии, остаточном ресурсе, надежности и безопасности.

Для России, объективно отстающей от развитых держав в плане инноваций, возник абсолютный императив ускоренного создания целенаправленных фундаментальных и прикладных знаний и, на их основе, умных устройств, инфраструктур и целых систем. Это также предъявило к фундаментальной и прикладной науке ЕврАзЭС новые, гораздо более высокие требования по качеству и скорости производства новых знаний.

Практическим выводом из этого является необходимость ориентирования теоретиков и прикладников-специалистов в области надежности, безопасности и риска на решение задач, которые могут возникнуть в результате применения такой технологии при создании и эксплуатации объектов инфраструктур нового поколения на всех этапах их жизненного цикла.

Наиболее важным следствием цифровизации в контексте рассматриваемой нами проблемы является проблема создания умных регионов, где проживающее там население осуществляет свою креативную, когнитивную и социальную деятельность. Речь идет о методологии придания региону свойств супраживучести (суть термина раскрыта ниже) для превращения его в умный устойчивый к развитию регион на основе использования программно-аппаратного комплекса ПАК ЖИБУР (**живучесть и безопасность умного региона**) состоящих из умных сенсоров, датчиков, пакета алгоритмов, интернета вещей и современных инфраструктур. Здесь следует отметить, что зарубежный бизнес быстро отреагировал на этот устойчивый и все ускоряющийся тренд созданием и предложением оборудования для умных производств и инфраструктур, прежде всего городских. Однако эти smart-устройства, вместе с предлагаемым к этому железу софтвером могут оказаться «троянским конем» и проводником кибератак на ключевые инфраструктуры жизнеобеспечения населения регионов и городов. Поэтому приобретение этих компонент для ПАК ЖИБУР должно быть хорошо обосновано.

Не вдаваясь в излишние для данной работы подробности, скажем, что любому непредвзятому наблюдателю ясно, что современный Кыргызстан имеет все необходимые (политическая воля) и достаточные (супраживучие умные и образованные люди, уникальные природные ресурсы) условия и средства, чтобы сделать квантовый скачок, освоить инновационные технологии, и сохраняя свои исконные традиции, осуществить вековую мечту – преобразовать свою страну в государство всеобщего благоденствия [1].

Перейдем поэтому к рассмотрению основных свойств критичных инфраструктур, которые понадобятся нам при создании супраживучего умного региона.

1.1.3 Краткое описание критичных инфраструктур

Современные инфраструктуры являются основой экономики, средством устойчивого роста ВВП, средне ожидаемой продолжительности жизни (СОПЖ) здорового населения и показателем стабильности страны. Ни власть, ни сельское хозяйство и промышленность, ни академические учреждения не могут себе позволить проигнорировать наблюдаемое фронтальное наступление континуума комбинаций возможностей и рисков, которая сопровождает возникновение и практическое использование умных инфраструктур нового поколения.

Суть, форма и успех современного общества будут определяться производительностью цифровых производственных технологий и характеристиками услуг, которые будут оказываться через эти инфраструктуры.

Под *критичной инфраструктурой* (КИ) в научном плане понимается многокомпонентная распределенная биогеотехническая система «*социум – человек – критичная инфраструктура – среда (СЧИС)*», состоящая из множества *взаимозависимых* КИ и взаимодействующих объектов и групп людей, рассматриваемых на конкретной территории в определенный отрезок времени. Системы (сети) инфраструктур состоят из [2]:

- хардвэра (комплексов и парков машин (промышленного, строительного и сельскохозяйственного назначения), приборов, аппаратуры, компьютеров, проводных, кабельных и беспроводных коммуникаций, конструкций, зданий и сооружений),
- софтвэра (программных комплексов, реализующих логистику транспорта и производства продукции, услуг и жизнеобеспечения, а также систем, использующих институциональные знания, социальные и культурные обычаи,

для создания индустриальных, сельскохозяйственных и общественных регламентов),

- корпуса специалистов, которые управляют и обслуживают эти системы. В совокупности эта триада образует инфраструктуры, распределенные по всей планете.

Эта, по образному выражению М. Горького, *вторая природа* – глобальный феномен, в отличие от первой природы (которую человек планомерно истребляет), непрерывно и достаточно быстро растет.

Врожденное триединство инфраструктуры как объекта исследования имеет принципиальное значение, так как позволяет холистически анализировать процесс создания материального производства, организацию его эффективного функционирования и одновременно, всесторонне учитывать человеческий фактор.

Инфраструктуры создаются для обеспечения безопасности и защиты жизни и стабильного развития экономики и общества. Такие системы призваны обеспечивать:

- 1) стабильное функционирование какого-либо потенциально опасного объекта (ПОО), кластера или целой отрасли сельского хозяйства или индустрии,
- 2) поддерживать жизнедеятельность населения и устойчивое развитие территории его проживания.

Критичные инфраструктуры являются одновременно своего рода *посредником и проводником* между окружающей средой и обществом. Катастрофа или авария, произошедшая с взаимозависимых критичных инфраструктур (ВКИ), немедленно распространяется как на окружающую среду, так и на население региона.

Актуальность и практическая ценность фундаментальных и прикладных исследований в этой области огромна: уменьшение риска критичных инфраструктур (КИ) приводит к увеличению СОПЖ населения в добром здравии и увеличению регионального богатства – валового продукта (ВВП). А это и есть императивные цели государств ЕвразЭС и их регионов и муниципалитетов на долгую перспективу.

Проблема оценки и управления региональным риском *сводима* к проблеме надежности и безопасности *полной* системы ВКИ этого региона. С междисциплинарных позиций предлагается *принципиально новый* подход к *упреждающему* управлению (менеджменту) техногенным риском критичных инфраструктур региона по критерию максимальной общественной пользы.

Из вышесказанного ясно, что системы инфраструктур – главный экономический и социальный инструмент ЛПР, с помощью которого можно эффективно управлять современным обществом. Поэтому *непрерывная целостность и работоспособность* этого

инструментария является главной заботой властных структур региона. Эти качества обеспечиваются живучестью критических инфраструктур.

Рассмотрим живучесть инфраструктур более подробно.

1.1.4 Живучесть региональных критических инфраструктур и территорий: современная концепция

Живучесть – это способность той или иной инфраструктурной системы продолжать выполнять свои проектные функции в условиях, когда она частично повреждена или лишена снабжения, что является безусловной и единственной основой, позволяющей создание надежной и безопасной умной территории.

Без наличия живучести невозможно создание умного региона/города, способного к устойчивому развитию. Живучесть взаимосвязанных инфраструктур – ключ к созданию безопасного умного региона

Около 10–15 лет назад городские менеджеры по всему миру поняли, что системы промышленной диагностики, мониторинга и технического обслуживания можно относительно легко адаптировать и использовать для оптимального запуска и обслуживания всех городских производственных, транспортных и спасательных средств. Вначале они медленно реализовывали эти идеи, но с появлением цифровизации и искусственного интеллекта, ускорили свои усилия по превращению своих городов – больших и малых – в умные города.

В настоящее время эта идея проникла и на уровень регионов в качестве центральной темы регионального развития. Так, в Свердловской области с 1 сентября 2018 г. запущен проект «Умный Регион», который охватывает всю Свердловскую область. Основная и единственная задача проекта состоит в массовом, параллельном во времени, внедрении разнообразных сервисов по шести направлениям [9].

В 21-м веке умный регион должен сначала стать живучим и безопасным, чтобы потом на этой основе, стать умным [3,4]. В целом к факторам, влияющим на живучесть региона, относятся: диапазон и степень опасности; риск для жизни, здоровья, здоровья и имущества; уязвимость и подверженность биологических, человеческих, социальных и экологических систем различным видам опасностей, а также степень (стратегической) готовности физических, социальных систем и систем управления к любым природным, городским или промышленным потрясениям и стрессам и их последствиям во время инцидентов, несчастных случаев, злонамеренных актов и проч.

Архитектура региональных (и городских) систем живучести (РСЖ) [4–8] имитирует различные давно существующие системы мониторинга и оптимизации технического обслуживания, предназначенные для повышения производительности критически важных сельскохозяйственных и промышленных инфраструктур (см. рисунок 1.1.2).



Рисунок 1.1.2 – Схема методологии ЖИБУР аналог систем диагностики и мониторинга надежности технических систем (оборудования нефтеперекачивающих и газокomppressorных станций, высотных зданий, мостов и т.п.)

Разница заключается в том, что региональная инфраструктура в целом представляет собой очень специфическую сложную систему взаимозависимых систем, которая широко распространена на всей территории региона, будучи 1) интенсивно используемой региональной общиной и 2) элементы ее транспортных и сельскохозяйственных инфраструктур (автомобили, автобусы, сельхозмашины, крупный рогатый скот) непрерывно перемещаются по территории региона. РСЖ предназначена для предоставления, в первую очередь, необработанных и обработанных данных о том, как региональная система критических инфраструктур (РСКИ) функционирует во времени.

Живучесть региональных СКИ состоит из следующих компонент [5,7,8]: 1) Структурная живучесть (надежность, вероятность отказа); 2) Конструкционная безопасность (уровень риска, зоны ущерба, все виды потерь); 3) Подсистема физического восстановления поврежденной системы. Эта подсистема может варьироваться в зависимости от способа восстановления (например, демократического или авторитарного), времени и стоимости восстановления, количества материальных средств, финансовых и

людских ресурсов, необходимых для восстановления; 4) Подсистема восстановления психического состояния возмущенного общества. Эта подсистема также варьируется в зависимости от объема необходимой психологической помощи и продолжительности ее оказания, а также от требуемых людских, материальных и финансовых ресурсов.

Стратегическая готовность КИ – это такое состояние системы, когда она остается надежной и безопасной и продолжает эффективно выполнять свои проектные функции, даже при внезапном приложении к ней *экстраординарных запроектных внешних воздействий*. Чаще всего это достигается за счет включения в ее состав подсистемы *глубоко эшелонированной защиты*.

Живучесть конструкции – это способность системы поддерживать свои функциональные возможности после воздействия нагрузок, превышающих их расчетные значения, или после определенного повреждения. Критическая инфраструктура имеет много функций; следовательно, она имеет как комплексную (интегральную), так и частичную живучесть. Как полная, так и частичная живучесть всегда условны, поскольку зависят от конкретных условий существования системы. Поскольку свойства КИ и стрессовые факторы, которые она испытывает, являются случайными, живучесть также случайна и может быть измерена как вероятность того, что КИ сохранит свои функции при любом конкретном случайном воздействии, выходящем за пределы проектных параметров. Термин «живучесть» тесно связан с термином «робастность», так как это означает, что система стабильна – она дает слабый отклик на сильное возмущение.

В концепции живучести разработанной автором используется подход, основанный на множественных опасностях, учитывающий живучесть ко всем типам вероятных опасностей. При этом речь идет не только о снижении рисков и ущерба от стихийных бедствий [т.е. гибель людей, телесные повреждения, потеря здоровья, элементов Матери-Природы (флоры и фауны), но и имущества, т. е. компоненты второй, созданной человеком природы], а также количественную способность быстро восстанавливать свое физическое и психологическое состояния после катастрофы до уровня который был *до наступления* события, но и становиться сильнее при выходе из кризисных ситуаций при минимально возможных затратах. Это и есть свойство супраживучести – формирование стратегии адаптации к переменам и изменениям и трансформация с целью стать сильнее [10].

Все вышеизложенное позволяет эффективно управлять региональными ВКИ и обществом, связанным с этими ВКИ, в обычное время и в периоды различных кризисов. ЛПР на уровне территорий и их муниципалитетов получают инструмент поддержки и обоснования своих решений. Не секрет, что из-за нехватки времени и нехватки гибких инструментов многие решения часто принимаются «на глазок», особенно если необходимо

учитывать долгосрочные последствия решений, а средств «заглянуть за горизонт» нет или они ненадежны. Используя вышеуказанный подход, ЛПР смогут отслеживать, как принятые решения влияют на качество жизни и уровень удовлетворенности их подопечных / избирателей.

Строго говоря, способность восстановления не должна рассматриваться как атрибут инфраструктуры как таковой (хотя это принимается практически во всех публикациях о живучести систем), поскольку восстановление поврежденной или разрушенной инфраструктуры осуществляется другой (строительной) инфраструктурой, в то время как третья (финансовая) инфраструктура служит источником средств для восстановления. Живучесть по критерию восстановления должна, очевидно, быть отнесена к строительным и финансовым филиалам предприятия, которое является владельцем поврежденной инфраструктуры, или главным образом к строительной организации, которая выполнила задачу восстановления, если она был передан на аутсорсинг. Это также зависит от изобретательности и качества управления активами, а также от особенностей регионального управления. Следовательно, живучесть системы состоит из двух частей. Одна из них (Res_{str}) – это живучесть физической системы как таковой, а другая, Res_{rec} , – это живучесть уже другой инфраструктуры, а именно той, которая проводит или управляет восстановлением поврежденной системы:

$$Res_{\Sigma} = Res_{str} + Res_{rec}. \quad (1.1.1)$$

Холистическая оценка потенциального риска (с учетом возможных изменений климатических констант в будущем) включает в себя исследование следующих угроз:

- 1) не(до)поставки того или иного жизненно важного продукта или сервиса (услуги) или нарушение производственного цикла промышленных предприятий, вследствие частичного или полного разрушения КИ,
- 2) ухудшения качества жизни населения и социума, гибели людей и/или нанесения им увечий,
- 3) частичного или полного истребления окружающей биосреды и сопутствующего этому нарушения устойчивости окружающей среды (временного или постоянного).

Поэтому умение определять полный ущерб, нанесенный ВКИ тем или иным (природно-) техногенным воздействием является важнейшей компонентой решения описанной выше проблемы. Вторая часть проблемы заключается в разработке методов и

средств защиты, которые позволили бы уменьшить/парировать потенциальные последствия аварий и катастроф ВКИ.

- 1) способность системы продолжать (в том числе, в ограниченном объеме) бесперебойное выполнение своих функций при наличии повреждения, вызванного определенным воздействием,
- 2) размер экономического ущерба, санитарных и безвозвратных потерь в результате аварии и при ее восстановлении,
- 3) время восстановления своих проектных функций после аварии или катастрофы.

1.1.5 Супраживучесть региональных критических инфраструктур

В тексте отчета слово супраживучесть уже неоднократно употреблялось без раскрытия существа этого термина. Латинское слово *супра* используемое как префикс означает «больше чем», «за пределом». Ниже дается определение слова *супраживучесть*, этого важнейшего понятия, основанное на его полном аналоге/эквиваленте, термине *антихрупкость*, которое ввел Н. Н. Талеб [11].

В качестве неотъемлемого свойства любой социально-технологической системы, которая явно включает в себя человеческое общество, состоящее из людей, способных адаптироваться, *становиться сильнее под воздействием тех или иных стрессоров* и принимать решения, основанные в некоторой степени на свободном выборе, в качестве его неотъемлемой части, супраживучесть может служить основой и инструментом для решения наиболее актуальных проблем современной цивилизации. Вербальная формула супраживучести имеет вид:

$$\text{Супраживучесть (Q)} = \text{Живучесть (Q)} + \text{Сверхкомпенсация/Превышение (Q)} \quad (1.1.2)$$

где

сверхкомпенсация (превышение) – это способность человека, социума или социально-технологической системы улучшать свои начальные параметры качества (какими бы они ни были) после воздействия определенных стрессоров Q (при условии, что они не превышают некоторые обычно неизвестные предельные пределы. Если они это делают, то это травмирует / ломает систему).

Если согласиться с этим определением, то тогда определение *региональной супраживучести* можно получить, модифицируя определение обычной живучести, данное Европейской комиссией, следующим образом:

Региональная супраживучесть – это способность региональной системы систем критических инфраструктур противостоять, адаптироваться, абсорбировать, быстро восстанавливаться от стрессов и потрясений, таких как засуха, природные, технологические или техногенные катастрофы, насилие, конфликты, и при этом *улучшить/увеличить свои начальные параметры жизнеспособности*.

1.1.6 Источники региональной супраживучести

В случаях, связанных с сельскохозяйственной, инженерной активностью или деятельностью в сфере услуг (туризм), региональные ЛПР должны следовать рекомендованным методам инженерных, сельскохозяйственных или других наук и конвергентных технологий согласно областей их компетенции, деятельности и ответственности, с учетом вероятностного характера проявления всех стрессоров. Например, используя методы конструкционной надежности и живучести, они могут: 1) Моделировать различные экологические, биологические, сельскохозяйственные или промышленные катастрофы, оценивать при этом количество полученных травм, число погибших людей, объектов флоры и фауны, и т. д., а также ресурсы и время, необходимые для возвращения системы в состояние «как новое» или «как прежде»; 2) Оптимизировать стоимость безопасной эксплуатации инфраструктур, с помощью проактивного предсказательного двух- или трехуровневого мейнтенанса (профилактическое обслуживание, ремонт, восстановление) [12]. Такой подход позволит *смягчить и минимизировать* последствия (в том числе, стоимость восстановления) всех перечисленных выше типов аварий и катастроф.

Если рассматривать супраживучесть отдельного произвольного взятого индивида, то надо различать это понятие в отношении его физических, когнитивных и социальных свойств, причем в каждой из этих категорий рассматривать какое-то одно специфическое свойство, чтобы понять как конкретно тот или иной стрессор, заданный своей энергией и паттерном времени действия, увеличит/уменьшит специфическую супраживучесть. Например, в когнитивной категории рассматривать способность индивида запоминать факты, события или языки; в физическом плане оценивать его скорость движения или способность к подъему тяжестей; в социальном плане – умение разговаривать с людьми, увлекать их за собой и т.п.

В целом теория супраживучести говорит о том, что более супраживучие компоненты общества должны помогать менее супраживучим, для того чтобы общество в целом становилось во всех смыслах сильнее и робастней. Для имплементации такого

подхода обществу нужны реальные примеры, которые убедительно говорят «делай как я». Таким примером на все времена мог бы стать главный герой кыргызского эпоса – батыр Манас, человек-легенда, супраживучий лидер, все невзгоды и удары судьбы делали его только сильнее во всех смыслах. Поэтому он использовал демократический способ обсуждения злободневных вопросов и выработки решений с опорой на мнение компетентных советников; он строго проверял исполнение принятых решений; он привлекал на государственную службу людей, используя принцип меритократии; он высоко ценил в людях готовность к восприятию инноваций; он ориентировал свое окружение на политику общенациональных интересов. Немаловажно, что при таком подходе, *суперживучесть Манаса* трансформируется из культурного феномена в общественно-политический и экономический феномен, что позволит сформулировать новую модель национального развития [12].

1.1.7 Анализ взаимозависимости критических инфраструктур

По своей сути теория системной живучести относится к теории непрерывности бизнес-процессов в приложении к обеспечению того или иного сервиса. Этот подход ныне используется всеми успешными операторами городских сервисов. Концепция живучести для обеспечения непрерывности сервиса(ов) проистекает из теории менеджмента информации, учитывая ту критичную роль, которую сейчас эта теория играет в успешном функционировании корпораций. Поэтому большинство терминологий и знаний, относящихся к непрерывности бизнеса, коррелируют с концепцией и теорией живучести (избыточность систем, методы резервирования, запасные источники энергии и т.п.).

Принятая повсеместно концепция умного региона предполагает *независимое* внедрение отдельных частных цифровизованных сервисов (т.н. вертикальная операционная система, см. рисунок 1.1.3), что чревато пропуском аварий по типу «черного лебедя». Правильным решением проблемы является рассмотрение взаимозависимости логистически связанных между собой сервисов (т.н. кросс-операционная система, см. рисунок 1.1.3). Взаимозависимость является основной проблемой ждущей своего решения при рассмотрении работы критически важных инфраструктур. В настоящее время существуют следующие возможные практические подходы для количественной оценки этой взаимозависимости: 1) Анализ взаимодействия КИ в виде транспортных сетей (см. рисунок 1.1.4); 2) Изучение взаимодействия и взаимозависимости КИ с использованием теории множественной регрессии; 3) Компьютерное моделирование взаимозависимости с

участием заинтересованных сторон (включая построение цифрового близнеца/близкого родственника исследуемых объектов) на основе ПАК-ЖИБУР [26]; 4) Биологический подход (пищевая цепочка).

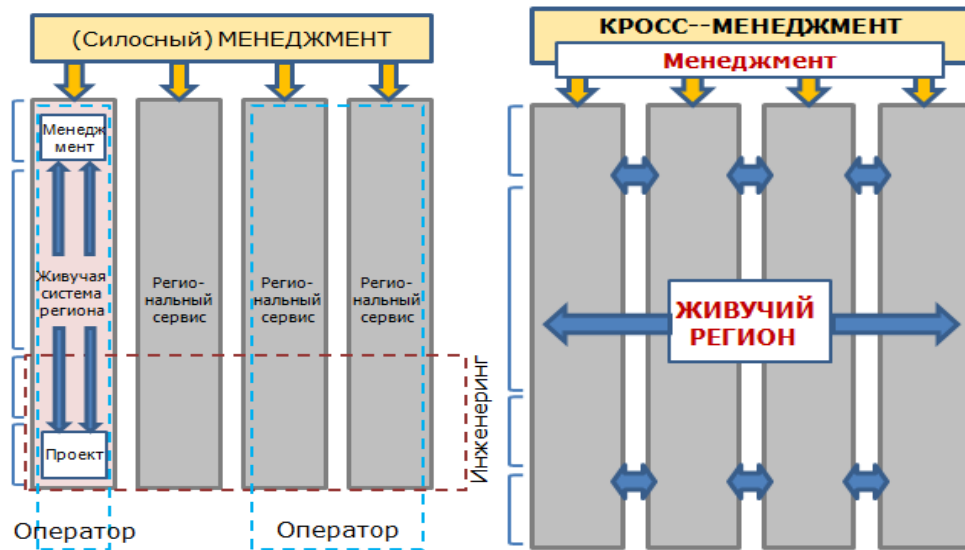


Рисунок 1.1.3 – Вертикально-операционный (силосный) и кросс-операционный подходы к управлению региональными сервисами

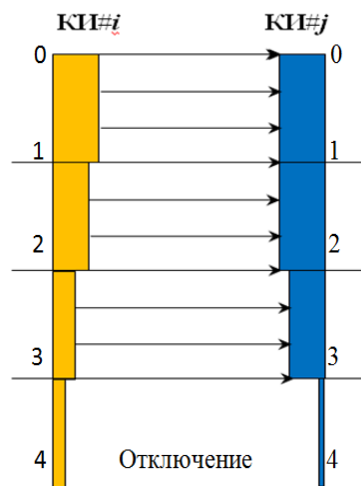


Рисунок 1.1.4 – Визуализация взаимозависимости двух КИ

Эта практическая синтетическая модель описывает функционирование взаимозависимых систем критических инфраструктур (ВСКИ), каждая из которых представлена в форме сети транспорта / услуг, состоящей из узлов и направленных каналов. Узлы обычно представляют собой компоненты физической инфраструктуры (так называемые активы, такие как электростанции, и установки для переработки нефти, газа и

воды, больницы, промышленные и офисные здания, исследовательские и образовательные центры, жилые помещения и т.п.), которые непосредственно участвуют в снабжении населения и местной промышленности различными продуктами или товарами, а также услугами. Связи сети моделируют поток (транспортировку продукта) между узлами и могут представлять электрические сети, магистральные и распределительные газо- и нефтепроводы; системы водоснабжения и канализации, а также железные и автомобильные дороги и т. д. Модель учитывает условия и особенности поставок, доставки, капитального ремонта и спроса на ресурсы, такие как электричество, горячая и холодная вода, а также удаление промышленных и отходов человеческой жизнедеятельности [13].

НИЦ предлагает учитывать по существу взаимозависимость всех сервисов и инфраструктур, используя для этого ПАК ЖИБУР. Вместо того чтобы рассматривать непрерывность функционирования каждой службы/сервиса как самостоятельной независимой единицы, ПАК ЖИБУР рассматривает функционирование региона как сеть взаимозависимых, интегрированных в региональную систему систем сервисов. Для того чтобы рассматривать живучесть с такой точки зрения, принципиально важно исследовать регион как эко-систему функционально *взаимозависимых друг от друга региональных сервисов*.

1.1.8 Инфранетика: инструментарий для разработки стратегии управления региональными рисками

Из сказанного выше ясно, что для создания оптимальной стратегии регионального управления рисками необходим специальный научный инструмент, который позволил бы использовать междисциплинарный подход и многочисленные методы из разных фундаментальных, прикладных и инженерных наук под одним концептуальным зонтом [10, 14].

В данной работе для этой цели используется новая конвергентная наука – *инфранетика*, основанная на конвергентной технологии MAICS (цифровая стохастическая механика, искусственный интеллект, теория информации, когнитивные и социальные науки). Название Инфранетика происходит от *Инфраструктуры + Кибернетика*. Инфранетика была построена для решения центральной проблемы безопасного инновационного развития региона / территории / муниципалитета на основе создания методологии гармонизации и регулирования регионального риска, основанного на оптимальном управлении системами взаимозависимых критических инфраструктур.

Описание метода можно найти в [14–16]. На рисунке 1.1.5 представлена схема построения такой стратегии с использованием концепции, философии и инструментария инфранетики.

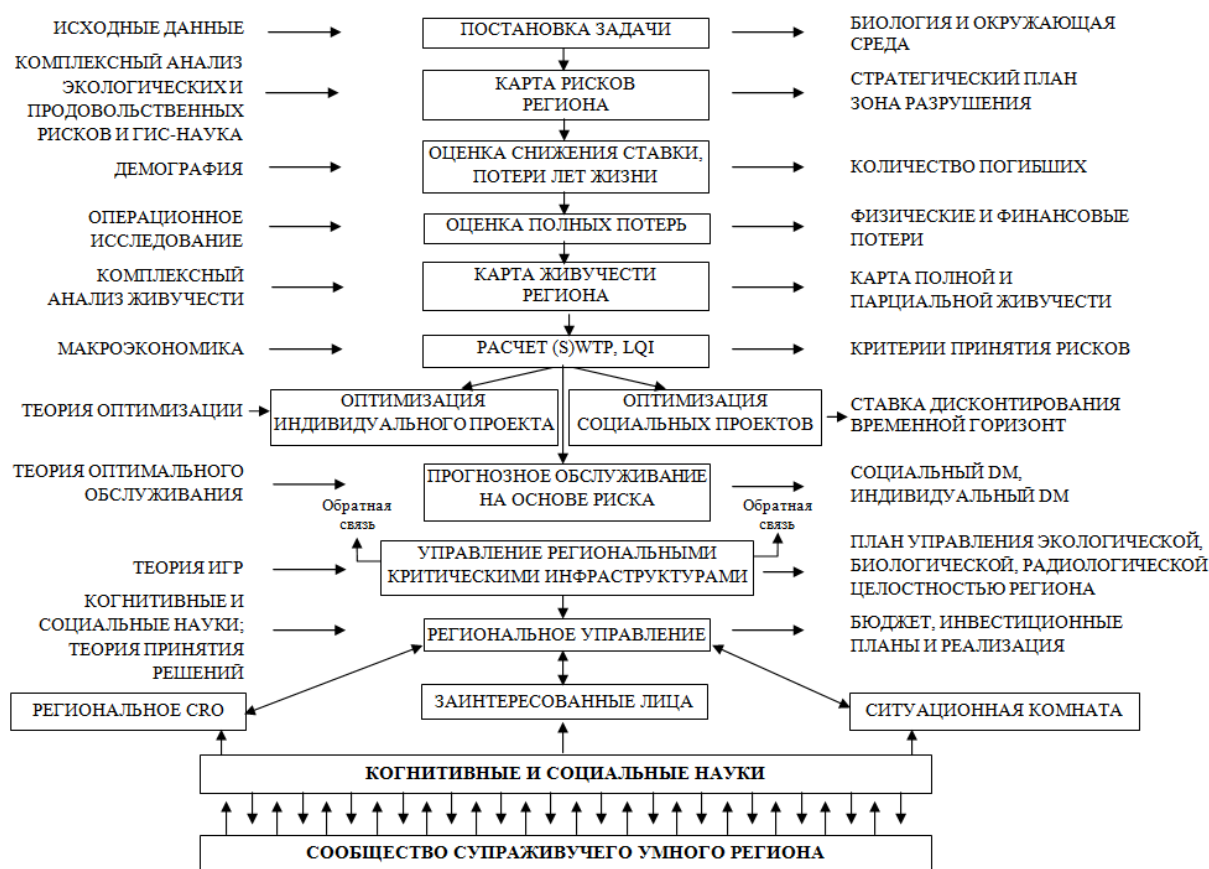


Рисунок 1.1.5 – Гармонизированное управление территориями (говернанс) по обобщенным критериям качества жизни

Можно видеть, что создание такой стратегии включает в себя разнородный набор исходных данных и знаний из множества фундаментальных, прикладных и технических наук. При решении этой проблемы для некоторых регионов Российской Федерации, автор столкнулся с несколькими неожиданными информационными пробелами (большинство из них известные неизвестные) в макроэкономике [18], демографии [19], теории надежности больших систем [20], которые потребовали немедленного решения, поскольку были препятствиями на пути к достижению поставленной цели. Фактически в этих случаях концепция инфранетики позволила количественно исследовать взаимосвязь функционирования физической инфраструктуры с показателями качества жизни населения и валового продукта региона, по-новому взглянуть на проблему и значительно ускорить процесс исследования. Накопление результатов такого рода междисциплинарных исследований позволяет понять, какие методы из каких дисциплин относятся к

инфранетике. Результаты, полученные по вышеуказанной схеме, позволили эффективно управлять территориальным риском в ряде регионов и муниципалитетов (см. [13,21,22]).

Инфранетика проявляется как перекрестно опыляющая дисциплина сложных наук. Это позволяет достаточно точно прогнозировать поведение сложных социально-технологических и экономических систем, которые разрабатываются или уже работают, в обычных и / или катастрофических ситуациях. Инфранетика использует проблемно-ориентированный подход, в соответствии с которым формируется единая концепция, описывающая пути и средства решения рассматриваемой проблемы. При системном использовании инфранетика может стать важнейшей конвергентной технологией и дисциплиной для управления умными супраживучими регионами и муниципалитетами в 21-м веке [16].

В данной работе предлагается использовать следующие четыре обобщенных *региональных* критериев, позволяющих осуществлять гармонизацию целей и задач частных, государственно-частных и государственных хозяйствующих субъектов [23].

1. Средняя ожидаемая продолжительности качественной жизни (СОПЖ) выбрана в качестве интегрального показателя величины риска, потому что она является *императивным показателем устойчивого развития и самого существования государства*.

2. Региональный индекс качества жизни (РИКЖ). Этот интегральный социальный индикатор связывает воедино показатели механической/физической надежности и безопасности элементов, конструкций и систем КИ с экономическими показателями их функционирования и социальными аспектами устойчивого развития территории.

Использование РИКЖ позволяет лицам, принимающим решения (ЛПР) регионального масштаба, проводить сбалансированную политику управления государственной, муниципальной и частной собственностью, расположенной на данной территории по критерию *СОПЖ населения*, региональной безопасности и роста регионального валового продукта РВП.

3. Супраживучесть критичной инфраструктуры в условиях изменяющегося географического и политического климата, которая, собственно, и определяет, как степень стратегической готовности региона, так и величину ущерба от частичного или полного отказа ВКИ.

Способность общества предотвратить гибель людей всегда конечна и ограничена способностью этого общества к созданию общественного богатства. В этих условиях *центральной проблемой управления величиной оцененного потенциально-возможного ущерба* (риска) становится оптимизация распределения (объема, места и времени приложения) ограниченных ресурсов на нужды безопасности, что эквивалентно

уменьшению последствий возникающих аварий и катастроф, ЧС всех типов, в том числе, климатических угроз, за счет применения тех или иных средств адаптации и защиты.

4. Региональная энтропия роста и деградации в ряде случаев может служить ранний диагностическим признаком ухудшения/улучшения качества функционирования региона.

1.1.9 Характеристика региона как системы систем критичных инфраструктур

Типовой регион (город) является сложной системой с неоднородной скоростью роста и иерархической инфраструктурой, каждый элемент которой адаптировался к нуждам региона в момент своей постройки (десятки, а то и сотни лет тому назад).

С ростом числа служб и сервисов, других систем критичных инфраструктур повышается вероятность проявления каскадных аварий с высокими скрытыми затратами (экономический и неэкономический ущерб от наводнений, засухи, эпизоотий, разрывов газо- водопроводов, нарушения целостности линий электропередач и т.д.).

Риски физического старения/износа, моральной деградации инфраструктур, всевозможные природные и техногенные катаклизмы, и прочие стрессоры могут быть смягчены и минимизированы только на основе *заложенной в инфраструктуры живучести* и оптимального планирования расходов на безопасность и продвинутого предсказательного их менеджмента по макроэкономическим критериям СОПЖ, ИКЖ и социальной/индивидуальной готовности платить (ГП).

1.1.10 Предлагаемое решение проблемы трансформации Иссык-Кульского района в супраживучую территорию

Для холистического решения обозначенной выше проблемы Научно-Инженерный Центр «Надежность и безопасность больших систем и машин» Уральского отделения РАН (НИЦ УрО РАН) предлагает использовать комплексный облачный ИТ-инструмент ЖИБУР (**Ж**ивучий и **Б**езопасный **У**стойчивый **У**мный **Р**егион типа SaaS (Software as a Service – софт как сервис – СКС), разработанный для информирования и помощи лицам, принимающим решения по повышению региональной супраживучести на основе количественного учета взаимосвязей между сервисами.

При этом мы исходим из того, что долгосрочными целями стратегического развития любого региона являются (1) развитие человеческого капитала, (2) повышение качества жизни, (3) роста конкурентоспособности цифровой экономики через системное внедрение

цифровых сервисов и инновационных решений, (4) обеспечение свойства супраживучести всем инфраструктурам и службам региона.

Доминантой экономики Иссык-Кульский района является сельское хозяйство и туризм, и в перспективе, возобновляемая зеленая энергетика. Проблемами, ждущими безотлагательного решения, являются: (1) зараженные сибирской язвой скотомогильники, (2) отвалы урановых рудников, (3) отсутствие станций очистки сточных вод в прибрежных населенных пунктах озера Иссык-Куль, (4) нелегальные свалки мусора.

Для системной оценки живучести и уязвимости инфраструктуры региона необходимо построить модели возможных природных, экологических, биологических и сельскохозяйственных аварий и катастроф, в том числе, каскадного типа: эпизоотий, эпифитотий, характерных для Иссык-Кульского региона. Необходимо также создать алгоритмы оценки индивидуальных, коллективных и социальных региональных рисков при всех типах аварий и катастроф, а также обеспечить кибер-безопасность и секьюрити всех региональных сервисов как элементов IoT (интернета вещей) за счет применения *блокчейн технологий*.

Все это предъявляет особые требования к ПАК ЖИБУР, который изначально создавался для создания умных живучих *городов*. В состав ПАК ЖИБУР для Иссык-Кульского региона (ИКР) придется вводить соответствующие программно-аппаратные комплексы, позволяющие создать умные решения перечисленных проблем, специфичных для ИКР.

Инструментарий ЖИБУР интегрирует в единую облачную цифровую платформу необходимые функциональные возможности для сбора ключевых данных от заинтересованных сторон региона для поддержки решений о создании, внедрении и эксплуатации региональных и городских служб, способствуя созданию и развертыванию стратегии живучести.

ИТ-инструмент ЖИБУР позволяет смягчить последствия региональных инцидентов и аварий по типу «домино», в которых первоначальное негативное воздействие антропогенных и природных стрессоров значительно усиливается за счет взаимозависимых активов/сервисов со скрытыми издержками. SaaS ЖИБУР поддерживает процесс привлечения к решению проблемы живучести различных региональных и городских субъектов, структурирования собираемой информации (Больших Данных) о взаимосвязях обслуживаемых объектов и моделирования каскадных эффектов. ПАК ЖИБУР может помочь ЛПР по Иссык-Кульской области сделать «сдвиг влево» и встроить элементы *предотвращения и прогнозирования* в процесс принятия решений и планирования операций, а не в стратегию реагирования и ответных действий. Новые

подходы, технологии и интеллектуальная информация на основе собираемых данных позволят укрепить способность Иссyk-Кульской области быть более подготовленной живучей территорией, а также обосновать объем необходимых инвестиций в повышение ее супраживучести. Платформа ЖИБУР предлагает метод и инструмент для информирования ЛПР и смягчения эффекта «домино», реализуя системный подход на региональную инфраструктуру и услуги, моделируя их взаимозависимости, собирая ключевую информацию о состоянии региональных и городских объектов в одном месте, что очень редко наблюдается на практике. ЖИБУР упрощает объединение широкого круга заинтересованных сторон вокруг общей модели функционирования региона, для более обоснованного выбора принимаемых решений. Структурирование информации обеспечивает большую прозрачность и долговечность выполняемого риск-анализа, что позволяет демистифицировать сложность региональных систем и восстановить потенциал поврежденных объектов. В целом, ЖИБУР предоставляет региональным властям возможность сделать осознанный выбор в отношении того, как коллегиально и гармонично реагировать на постоянно растущие потрясения и стрессы, которым подвергается практически любая современная область.

1.1.11 Ключевые особенности программно-аппаратного комплекса ЖИБУР (живучесть и безопасность умного региона)

Платформа ЖИБУР – это облачное решение (SaaS – программное обеспечение как услуга) для управления интегрированным процессом оценки и управления живучестью города или территории. Все региональные игроки (игрок – принятое в макроэкономике определение влиятельного участника экономической активности региона) имеют возможность зарегистрироваться на платформе, чтобы помочь координатору/эксперту по живучести курировать анализ сиюминутной ситуации и поддерживать повседневное управление региональными службами.

ЖИБУР включает в себя функции онлайн-обучения для развития навыков назначенных ответственных за живучесть региона, а также других заинтересованных акторов, выполняющих определенную роль в обеспечении живучести региональных объектов. Это гарантирует, что со временем регион может самостоятельно поддерживать функционирование платформы. Процесс построения региональной живучести начинается с привлечения основных заинтересованных сторон для взаимного уяснения их целей, проблем и текущих средств управления живучестью. Эти стороны руководствуются процессом построения системной модели своей области, заложенным в ЖИБУР, которая

моделирует характеристики региональной инфраструктуры и служб, и, что важно, характер их взаимозависимости на разных уровнях. На основе использования интерактивного сотрудничества заинтересованных сторон происходит сбор ключевой информации, необходимой для моделирования и имитации эффектов домино при каскадных авариях и сбоях. Это объединяет и организует информацию, которая в настоящее время распылена среди многих заинтересованных региональных субъектов. Далее платформа ЖИБУР используется для разработки сценариев потенциальных инцидентов, аварий и катастроф, вызывающих озабоченность региональных властей, чтобы понять как, действуя совместно, можно снизить риск или последствия инцидентов. Такой риск-анализ помогает понять последствия тех или иных изменений в управлении критичными инфраструктурами – будь то улучшения операционных процедур или поддержка бизнес-кейсов для более существенных инвестиций. В сочетании они образуют основу плана действий по обеспечению живучести региона. Все это помогает области перейти от пассивного реагирования к гораздо более информированным и активным действиям. ЖИБУР заполняет существующий пробел между заявленным намерением той или иной области стать более живучей, и множеством существующих часто фрагментированных и специфичных для обслуживания операционных систем, создающих трудно анализируемую какофонию несовместимых цифровых средств.

Платформа может быть дополнена более детальным имитационным моделированием живучести объектов, представляющих особый интерес. Она совместима с другими существующими платформами живучести, что обеспечивает их интеграцию в пределах оперативных региональных центров управления и контроля. В случае возникновения опасности использование ЖИБУР в качестве системы поддержки принятия решений может помочь государственным органам Иссык-Кульской области и всем операторам на ее территории принимать взвешенные решения.

Совместное использование ЖИБУР всеми игроками помогает уменьшить материальные и человеческие потери при управлении областью, помогая планировать стратегические действия, чтобы сделать регион инклюзивным, безопасным, живучим и устойчивым к развитию. ЖИБУР является дополнительным ресурсным инструментом для других систем обеспечения живучести регионов. Системное видение региона на основе платформы ЖИБУР способствует развитию партнерских отношений между правительством, частным сектором и гражданским обществом, а также дает возможность менеджерам создавать и управлять живучестью региона.

Функциональные возможности инструмента ЖИБУР (перечисленные выше) позволяют всем заинтересованным игрокам участвовать в процессе построения стратегии

и наращивания потенциала живучести различных технических сетей. Возможность моделирования поведения региона позволяет лучше понять уровень общественного риска во времена его нормального и кризисного функционирования.

Первая, прорывная испано-английская версия ЖИБУР (под маркой HAZUR) была создана в 2013 г. группой испанских специалистов при консультационном участии научного руководителя НИЦ С.А. Тимашева и с успехом использована впервые в мире в городах Барселоне (Испания), Бристоле (Англия), Лиссабоне (Португалия), Бенадорм, Ла-Гарротха, Сен-Кугат-дел-Вальес Тарраса, Тремп (все – Испания) [24, 25].

Накопленный опыт практического применения инфранетики для преобразования городов и регионов в умные субъекты позволяет утверждать, что она позволит ИКР региону получить следующие выгоды:

- экологические:
 - 1) обеспечение соблюдения природоохранного законодательства;
 - 2) снижение негативного воздействия на окружающую среду;
 - 3) лучшее управление природными ресурсами;
- экономические:
 - 1) снижение ущерба инфраструктуре;
 - 2) установление инвестиционной приоритетности объектов областного хозяйства;
 - 3) оптимизированные затраты на инвестиции в окружающую среду;
 - 4) оптимизация эксплуатационных расходов;
 - 5) рациональное ведение экономической деятельности;
 - 6) минимизация необходимых ресурсов при проведении антикризисного управления;
- социальные:
 - 1) повышение общественной, в том числе, кибер- безопасности;
 - 2) повышение устойчивости и непрерывности бизнеса и услуг;
 - 3) распространение практических знаний о живучести регионов;
 - 4) более защищенные граждане;
 - 5) предотвращение или минимизация летальных исходов, увечий и травм;
 - 6) обеспечение лучшего базового обслуживания граждан.

1.1.12 Концепция построения супраживучего умного Иссык-Кульского региона Республики Кыргызстан

На основе анализа и обобщения мирового опыта создания умных городов и первичного опыта Свердловской области РФ по созданию умного региона (УР) [9], можно предложить шесть функционально-технологических областей цифровизации. В первом приближении это:

умные: (1) **образ жизни** (содействие повышению качества жизни населения региона), (2) **люди** (повышение уровня цифровой культуры населения региона и всех процессов его обучения), (3) **экономика** (внедрение инноваций и цифровых технологий в секторе экономики с целью обеспечения конкурентоспособности на мировом уровне); (4) **мобильность** (оптимизация пассажиропотока и дорожного движения, внедрение автономных транспортных средств), (5) **управление** (обеспечение прозрачности принятия решений на основе сохранения данных и повышения качества и объема предоставляемых госуслуг в электронной форме) и (6) **среда** (использование цифровых технологий для снижения потребления ресурсов и мониторинга качества окружающей среды, а также быстрого реагирования на загрязнение и аварийную ситуацию). Этот перечень практически перекрывает всю номенклатуру деятельности любого региона республики Кыргызстан (энергетика, промышленность, сельское хозяйство, туризм, ЖКХ, медицина образование, культура и т.п.) или города – от кишлака до города миллионника (Бишкек).

В обозначенных выше рамках предлагается следующий *реестр первой очереди* цифровых сервисов-решений, в котором учтена специфика инфраструктуры Иссык-Кульской области и республики Кыргызстан в целом:

Государство–гражданин: [единый портал *госуслуг*; система электронных референдумов (с использованием идейного актива эпоса «Манас»)];

Администрация–Администрация: [электронный документооборот, платформы межведомственного взаимодействия];

Администрация–Бизнес: [информация малого и среднего бизнеса о проведении инновационных госзакупок];

Администрация–госслужащие: [информация о льготах, формах поддержек, профсоюзной активности].

Супраживучесть и безопасность: [технологии предсказания потенциальных угроз, в том числе, по типу «черный/серый лебедь»; общественная безопасность; автоматизированный мониторинг объектов];

Финансы: [технологии распределенного реестра (блокчейн)];

Сфера сельского хозяйства: [технологии умного животноводства (молочного кластера, овцеводства); технологии умного земледелия [26, 27]];

Сфера производства: [роботизация производственных систем; цифровое управление];

Вторичное использование ресурсов: [технологии дистанционного мониторинга охранной зоны озера Иссык-Куль; автоматизация сбора и утилизации отходов];

Культура и туризм: [технологии дополненной реальности, в первую очередь, применительно к священному озеру Иссык-Куль, умные курорты];

Строительство и жилье: [система BIM интеллектуального проектирования зданий];

Здравоохранение: [системы телемедицины; единая медицинская информационная система; технология персонализации лечения];

Изобретательская социальная активность и креативность: [единая площадка взаимодействия жителей (села, микрорайона, города, мегаполиса; живые лаборатории; открытые центры разработки мобильных приложений];

Окружающая среда и экология: [умный мониторинг радиационных отвалов урановых рудников, состояния поверхностных водных объектов, побережья озера Иссык-Куль; умный мониторинг зоотехнической ситуации распространения трансграничных инфекций и паразитарных заболеваний сельскохозяйственных животных и растений; умная городская среда (контроль уровня городского загрязнения (воздух, водные объекты, земля, шум); интеллектуальные энергетические системы возобновляемой энергии];

Образование: [система всеобщей компьютерной грамотности; дистанционное образование; интеллектуальная образовательная среда; повышение квалификации и переподготовка специалистов в области анализа и управления региональным риском];

Транспортные системы: [умные светофоры; сервисы сообщения автономных транспортных средств (АТС); сервисы распознавания дорожной инфраструктуры АТС; система поиска попутчиков (каршеринг); умные парковки];

Розничная торговля и логистика: [умные кассы; технологии автоматизированных складов];

Сфера ЖКХ: [система автоматизированного учета объемов потребляемых ресурсов].

Для безопасной имплементации представленных выше сервисов, в ПАК ЖИБУР предусмотрена возможность использования технологии блокчейн по версии Эмеркоин (специально подогнанную под проблему умного региона при участии НИЦ УрО РАН). В настоящее время технология Эмеркоин используется для точного выполнения следующих

функций: (1) Подтверждение данных, кадастровый учет; (2) подтверждение аттестатов и дипломов; тайм-стемп (регистрация времени создания) документов); (3) Компьютерная безопасность (системы доступа пользователей, DNS-адресация сайтов в интернете, защищенная IP-телефония, товары и собственность, подлинность товаров и услуг, права владения цифровой собственностью).

Для ПАК ЖИБУР для ИКР предусмотрено распространения технологии блокчейн на все диагностические и мониторинговые измерения, при оценке ущербов и транзакциях связанных с мейнтенансом (техническим обслуживанием и ремонтом) критичных взаимозависимых инфраструктур, и инвестициях в проекты, связанных с повышением безопасности и живучести региональных объектов.

Платформа Эмер состоит из цепочки блоков высокой защищенности и сети пользователей (рисунок 1.1.5) с полной историей транзакций между ними. Она позволяет участникам обмениваться коинами, информацией и подтверждать историю транзакций.



Рисунок 1.1.5 – Существующая сеть Эмеркоин

Возможности платформы Эмер с использованием обычных компьютеров:

- верификация диагностики (данных сенсоров, команд управления, событий), мониторинга и мейнтенанса инфраструктур всех типов, надежность записей,
- временные цепочки показаний датчиков и приборов с *полным доверием для участников сети*,
- подтверждение оценок ущерба от инцидентов, аварий и катастроф,
- учет транзакций в IoT (интернете вещей), микроплатежи,
- оптимизация регионального говернанса, кибербезопасность,
- интеграция с ЖИБУР и физической подсистемой региональной живучести,

- запись (не более 20 Кбайт)/чтение данных в произвольном формате с любого узла сети,
- обмен данными с блокчейном по http, через стандартизованный API, локально или через удаленный сервер,
- выделение географических зон и групп пользователей.

ПАК ЖИБУР по замыслу осуществляет кардинальное, научно-обоснованное практическое решение проблемы обеспечения непрерывности бизнес-потоков цифровых сервисов и инфраструктур в условиях ЕврАзЭСовских реалий, поскольку позволяет:

- выявлять зоны уязвимости региона или города,
- оценивать глубину (число вовлеченных в аварию сервисов/инфраструктур) при возможных каскадных авариях,
- вырабатывать практические меры по предотвращению и уменьшению последствий аварий и катастроф,
- обеспечить безопасность региональных сервисов и инфраструктур в кратко- и долгосрочной перспективе,
- оптимизировать инвестиции в безопасность региональных инфраструктур по макроэкономическим критериям индекса качества жизни (ИКЖ) и готовности платить (ГП),
- осуществлять оперативную поддержку принятия управленческих решений на уровне региона и его городов по территориальным критериям средней ожидаемой продолжительности жизни (СОПЖ) и региональному индексу качества жизни (РИКЖ); эти критерии позволяют активно управлять экономикой региона и обеспечить рост продолжительности жизни в добром здравии,
- провести обучение технологиям безопасности и основам управления живучестью региональных инфраструктур как сотрудников Администраций муниципалитетов и заинтересованных организаций, так и студентов-магистрантов (совместно с Институтом Строительства и Архитектуры УрФУ),
- подготовить экспертов в этой области для работы в составе экспертных групп,
- создать офис региональной/муниципальной живучести,
- организовать деятельность живой лаборатории в области социальной безопасности,
- адаптировать жителей Исык-Кульского региона ко все ускоряющимся изменениям цифровых технологий 21-го века и оперативно купировать/минимизировать социальные стрессоры,

- построить виртуальную цифровую модель живучести Иссик-Кульского региона.

В результате применения ПАК ЖИБУР возможно, к примеру, визуализировать: карту индивидуального риска (показана часть г. Екатеринбурга, рисунок 1.1.6) процесс каскадного развития аварии типа «потеря снабжения ресурсом» (рисунок 1.1.7), карту живучести (рисунок 1.1.8) и взаимозависимости городских инфраструктур (рисунок 1.1.9), а также карту риска керосинопровода Манчестерского аэропорта (рисунок 1.1.10); схема послыного анализа инфраструктур Архангельской области (рисунок 1.1.11).

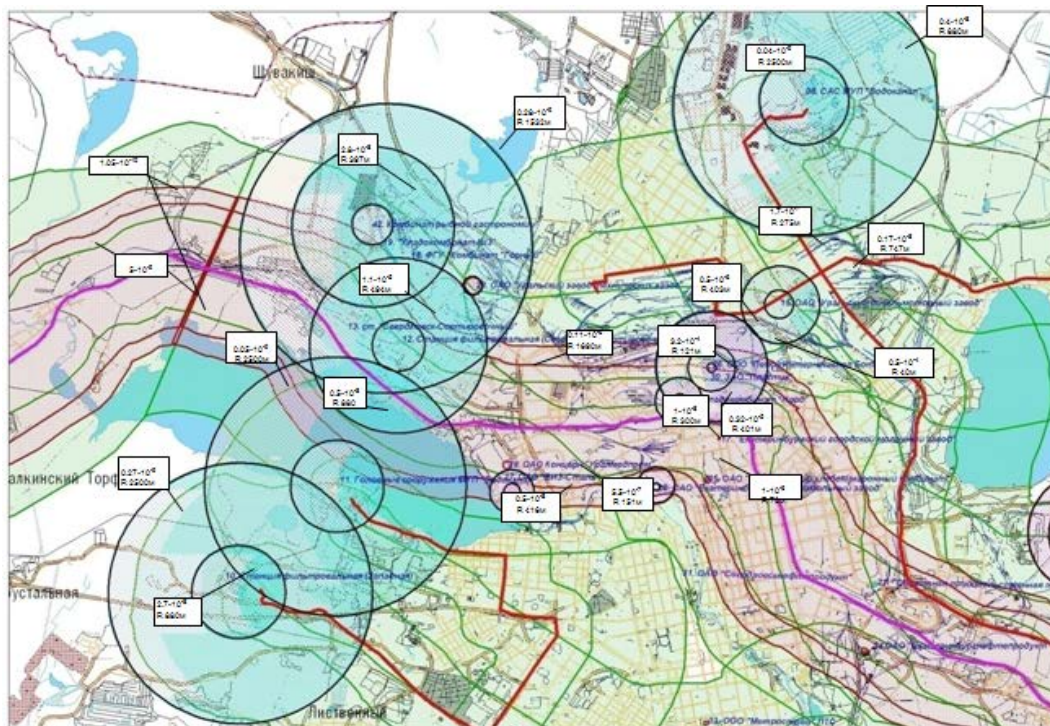


Рисунок 1.1.6 – Оценка уязвимости города – карта риска г. Екатеринбурга



Рисунок 1.1.7 – Пример каскадной аварии взаимозависимых городских сервисов



Рисунок 1.1.8 – Карта живучести и взаимозависимости региональных служб / инфраструктур



Рисунок 1.1.9 – Полная карта взаимозависимости сервисов и инфраструктур г. Екатеринбурга



Рисунок 1.1.10 – Потенциальный риск керосинопровода Манчестерского аэропорта



Рисунок 1.1.11 – Взаимозависимые инфраструктуры Архангельской области

Для успеха проекта «Умный регион» необходимо опережающими темпами *создать его цифровую виртуальную модель*, на которой можно отрабатывать методом компьютерного моделирования все свойства, относящиеся к супраживучести и безопасности. Неотъемлемой частью этой виртуальной модели будет человеческий фактор в виде *живой лаборатории* (рисунок 1.1.12) в составе:

- 1) Стратегического Совета стейкхолдеров региона/города, в составе Главы региона – Полномочного Представителя Правительства КР по региону (в Иссык-Кульской области – *Осмоналиев Акылбек Шарипович*), Главного специалиста региона по живучести (Region Chief Resilient Officer-RCRO) и других лиц,
- 2) совета руководителей всех основных/критичных служб и бизнесов региона,
- 3) группы исполнения дорожной карты Стратегического Совета,
- 4) активных супраживучих жителей региона.

Это позволит впервые установить эмпирическую связь между осязаемым и неосязаемым: качеством функционирования региональных систем и благополучием людей живущих в данной среде.

ЖИВАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

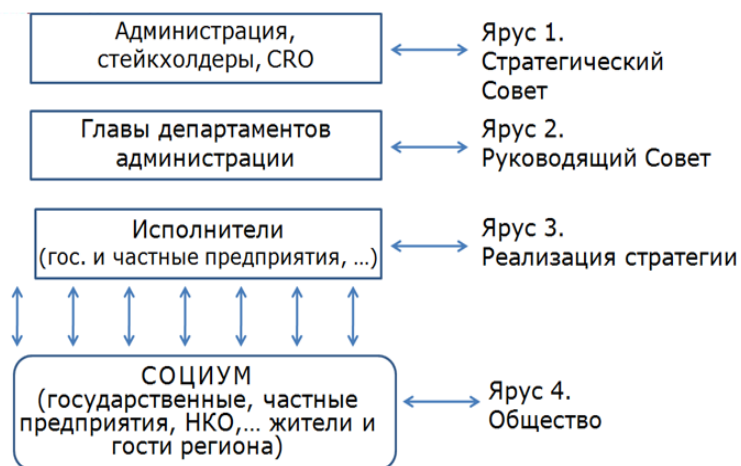


Рисунок 1.1.12 – Четырехярусная структура социально-природно-технологической модели региона

В ситуационной комнате РСЖ (см. рисунок 1.1.13) группа специалистов по региональной живучести обеспечивает полноценную и всестороннюю поддержку принятия стратегических и тактических решений, вырабатываемых на всех этапах региональной власти, в том числе:

- моделирование сценариев, сгенерированных Советом стейкхолдеров;
- создание цифровых двойников (и квазидвойников) региона, территории, муниципалитета, системы, объекта.

В целом, процесс ЖИБУР – обеспечивает непрерывности бизнес-потоков за счет управления региональной супраживучестью по методике НИЦ УрО РАН.

Прорывная технология управления (говернанса) региональным риском по обобщенным критериям – средняя ожидаемая продолжительность жизни в добром здравии (СОПЖ), индекс качества жизни, живучесть взаимозависимых инфраструктур и территориальная энтропия – позволяет установить связь между измеряемыми параметрами функционирования второй природы (системами критичных инфраструктур) и не измеряемыми (пока) параметрами социума, который эксплуатирует эту инфраструктуру, живет в ее среде и пользуется ее услугами.

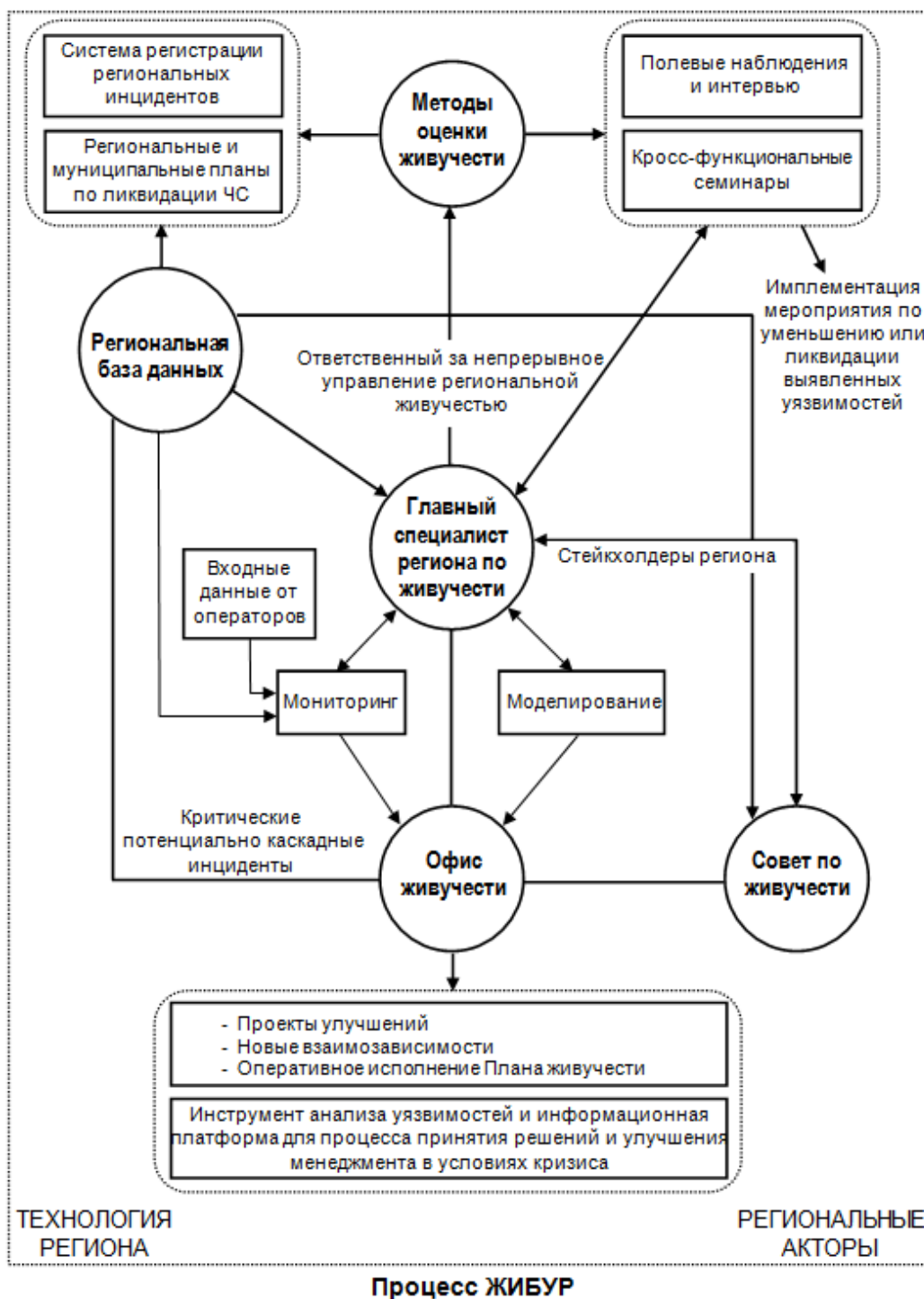


Рисунок 1.1.13 – Обеспечение непрерывности бизнес-поток за счет управления региональной супраживучестью по методике непрерывного совершенствования ПК ЖИБУР

Особенно значимыми результатами здесь являются:

- методы, позволяющие количественно оценить сокращение СОПЖ от потерь жизни и увечий при авариях и катастрофах,
- методы оптимизации затрат на сохранение жизни при известных СОПЖ, РВП, уровне занятости населения, сроке службы объекта, горизонте

- дисконтирования и источнике финансирования (общество, частные средства),
- метод мейнтенанса критичных инфраструктур, позволяющий сохранять и увеличивать уровень безопасности, заложенный в объект при его проектировании, на всех стадиях его жизненного цикла, а также непрерывность бизнеса.

Разработанная методология относится к MAICS-технологии и инфранетике и увязывает результаты теории сооружений, цифровой механики разрушения, риск-анализа, теории оптимизации, демографии и макроэкономики, когнитивных и социальных наук, а также тех наук, которые определяют специфику региона (биология, сельское хозяйство, туризм).

1.1.13 Потенциальные потребители платформы ПАК ЖИБУР

Местные власти, кто руководит государственным сектором области и напрямую страдает от недостатка живучести взаимозависимых инфраструктурных систем. В некоторых случаях они не обладают административной компетенцией или техническими навыками, чтобы противостоять различным внешним и внутренним стрессорам и воздействиям, но имеют непосредственное отношение к управлению региональными службами, которые должны справляться с последствиями эпизоотий, инцидентов, сбоев, техногенных аварий, изменения климата и прочее.

Менеджеры и специалисты по планированию действий в чрезвычайных ситуациях в зоне риска, которые разрабатывают планы действий в чрезвычайных ситуациях, выполняют передовые консультативные услуги по проектированию методов реагирования на возникающие угрозы, и, следовательно, оказывают непосредственное влияние на реализованные риски. Они и консультанты государственного сектора нуждаются в новых подходах к управлению чрезвычайными ситуациями, к предварительной подготовке к таким событиям, принятию решений во время кризиса и системе обучения после ликвидации последствий воздействия.

Провайдеры и поставщики региональных сервисов/услуг. В эту группу входят руководители и операторы важнейших инфраструктур и объектов сельского хозяйства, агропрома, промышленности, специалисты по проектированию систем водоснабжения и водоотведения, объектов градостроительства и жилищного строительства. Они могут выполнять субподрядные работы или иметь в своем составе отделы для решения проблем региональной живучести и быть заинтересованы в том, чтобы выполнять какие-то задачу по обеспечению живучести.

Консультанты /частные компании

Экологические консультанты или частные компании проводят опросы и информируют компании о вариантах снижения негативного воздействия на природу, соответственно.

Исследователи (НАН КР, университеты и исследовательские учреждения)

Эти специалисты разрабатывают более точные модели диагностических измерений атмосферных, водных потоков, промышленных землетрясений, различных систем сигнализации для наводнений, предотвращения засухи и т.д., которые требуются для реализации инструментальной части подсистемы живучести региона, в том числе, био-катастроф.

1.1.14 Выгоды от применения ПАК ЖИБУР

Возможные выгоды от применения ПАК ЖИБУР:

- предсказывает возможность проявления каскадных аварий в регионе,
- улучшает менеджмент ликвидации и смягчения последствий каскадных аварий: реакцию, координацию между агентами и предотвращает аварии,
- ранжирует инвестиции и улучшает инфраструктуры,
- устанавливает связь между ГИС и комплексной информацией, которая перетекает внутри процессов принятия региональных решений и выработки политики,
- менеджмент ежедневных инцидентов с позиций живучести,
- оптимизация операционных расходов,
- кросс-функциональная визуализация региональных сервисов,
- улучшение интегрированного менеджмента инфраструктур, функционирования региональных сервисов,
- защита от потенциального климатического, природного или технического импакта,
- улучшение кооперации между операторами сервисов; устранение нарушений взаимозависимостей инфраструктур,
- выявление зон, где необходимо повышение живучести (предложения по месту установки сенсоров, оптимизация инвестиций по критериям индекса качества жизни).

1.1.15 Заключение к разделу 1.1

Свойство живучести – это способность системы инфраструктур продолжать выполнять свои проектные функции в условиях, когда она частично повреждена и / или лишена снабжения, а также у работников и населения, испытывающих психологический стресс. Это обстоятельство является безусловным и единственным основанием для создания супранадежной и безопасной умной территории. Концепции приемлемых рисков, разработанные для управления технологическими, производственными и природными рисками, вполне совместимы с авариями и катастрофами по типу «черный лебедь».

Без супраживучести невозможно создать умный регион / город, способный к устойчивому развитию. Живучесть также необходима для достижения долгосрочных целей стратегического развития любого региона, которые включают развитие человеческого капитала, повышение качества жизни и конкурентоспособности экономики посредством систематического внедрения услуг и инновационных решений.

Сохранение экологической целостности Иссык-Кульского региона, у которого доминирующим сектором экономики является сельское хозяйство и туризм (на жемчужину Средней Азии – священное озеро Иссык-Куль), и его развитие в 21-м веке наиболее целесообразно выполнить с позиций инфранетики и МАИКС технологий.

Предлагаемая стратегия управления регионом (говернанс) представляет собой предсказательный менеджмент, который учитывает все возможные в условиях Иссык-Куля угрозы и риски. Эта стратегия позволяет придать Кыргызстану новое инновационное измерение, позволяющее решить задачу непрерывного роста ВВП республики с одновременным повышением благосостояния ее жителей и роста производства товаров и услуг (в первую очередь, аграрного сектора и туризма).

Целесообразно начать движение в указанном направлении с пилотного проекта создания *супраживучей* Иссык-Кульской области, включая экспертизу и анализ путей повышения экологической, продовольственной, техногенной и урбанистической безопасности Кыргызстана, основанный на анализе надежности, живучести, риска и безопасности по методологии инфранетики.

Необходимо также провести синтез разнородных технологий управления: оптимизация долгосрочных и краткосрочных инвестиций (по критериям индекса качества жизни и готовности платить), оптимального мейнтенанса, блокчейна, а также критериев максимизации среднего ожидаемой срока жизни и максимальной супраживучести.

Целесообразно опережающими темпами начать подготовку и переподготовку национальных специалистов в области анализа и управления территориальными рисками на базе НИЦ УрО РАН и Института строительства и архитектуры УрФУ.

1.2 Разработка методов мониторинга состояния инфраструктур на основе векторной энтропии

1.2.1 Энтропийное моделирование стохастических систем

Понятие мониторинга системы вбирает в себя много разных аспектов. Согласно энциклопедии «Гражданская защита» [1], под мониторингом понимают систему постоянного наблюдения за явлениями и процессами, проходящими в окружающей среде и обществе, результаты которого служат для обоснования управленческих решений по обеспечению безопасности людей и объектов экономики. В рамках системы наблюдения происходит оценка, контроль объекта, управление состоянием объекта в зависимости от воздействия определённых факторов [2]. Таким образом, задачи мониторинга включают в себя, наряду с оценкой, контролем состояния, диагностикой системы, также управление в виде управленческих решений.

Сложные системы в разных отраслях, как правило, имеют стохастический характер поведения и являются многомерными. Такие сложные стохастические системы S можно представить в виде многомерной непрерывной случайной величины $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$, имеющей некоторую совместную плотность распределения вероятностей $p_{\mathbf{Y}} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ [3]. Каждая компонента Y_j этого случайного вектора \mathbf{Y} – одномерная случайная величина, характеризующая функционирование соответствующего элемента системы S . Элементы Y_j могут быть как взаимозависимыми, так и не зависеть друг от друга.

Преимущества статистического отображения сложных систем и процессов по сравнению с аналитическими методами можно объяснить тем, что в этом случае упрощается постановка задачи. Вместо трудоёмкого и не всегда возможного выявления и изучения всех детерминированных связей между элементами сложной системы, на основе выборочного исследования получаем статистические закономерности и затем распространяем их на поведение системы в целом. Однако для получения статистической закономерности требуется сформировать репрезентативную выборку и обосновать правомерность применения статистических выводов. В противном случае применение статистических методов может привести к неверным результатам.

В 1948 г. К. Шеннон в своей работе «A Mathematical Theory of Communication» [4] получил формулу для оценки неопределённости кодовой информации в дискретном случае в каналах связи, называемую *информационной энтропией* Шеннона:

$$H_I = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (1.2.1)$$

где

p_i – вероятность встречаемости i -го символа в коде, содержащем n символов, $\sum_{i=1}^n p_i = 1$.

Кроме этого К. Шеннон в той же работе [4] эвристически предложил формальный аналог понятия информационной энтропии для m -мерной непрерывной случайной величины \mathbf{Y} с плотностью распределения $p_Y(x_1, \dots, x_m)$

$$H(\mathbf{Y}) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} p_Y(x_1, \dots, x_m) \log p_Y(x_1, \dots, x_m) dx_1 \dots dx_m \quad (1.2.2)$$

Эта величина впоследствии А.Н. Колмогоровым совместно с И.М. Гельфандом и А.М. Ягломом была названа дифференциальной энтропией [5].

Использование другого термина подчёркивает то, что выражение (1.2.2) имеет иной смысл, нежели информационная энтропия дискретных распределений (1.2.1). Основание логарифма в (1.2.2) должно быть больше единицы. Его выбор определяет единицу измерения соответствующего количества информации. В теории информации часто используют двоичный логарифм, что соответствует единице количества информации бит, а сам функционал интерпретируется как средняя информация непрерывного источника. В математической статистике в определении дифференциальной энтропии по соображениям удобства обычно используют натуральный логарифм, функционал интерпретируется как мера неопределённости непрерывного распределения. Поскольку в дальнейшем рассматриваются аспекты моделирования стохастических систем, то будем использовать в качестве основания натуральный логарифм. Также отметим, что в отличие от (1.2.1), выражение (1.2.2) не ковариантно относительно изменения системы координат (базиса пространства) и может принимать отрицательные значения.

Формула (1.2.2) представляет собой также *статистическое выражение для энтропии*. Тем самым, она применима во всех системах, в которых определено понятие вероятности, например, в физике, биологии, экономике и т.д. [6].

Энтропия оказалась особенно ценна в теории информации, сам К. Шеннон [7] определял величину (1.2.1) как играющую центральную роль в теории информации в качестве меры количества информации, возможности выбора и неопределенности.

Информационная энтропия (1.2.1) часто используется для моделирования сложных систем различной природы (в экономике, технике, обществе, биологии, механике, экологии, физике, лингвистике и др.). Однако использование информационной энтропии для моделирования многомерных стохастических систем, как отмечено в [3], сталкивается несколькими серьезными затруднениями, а именно:

1. Расчет информационной энтропии по формуле (1.2.1) требует оценки вероятностей p_i элементарных состояний системы. Это требует больших выборок для обеспечения достаточной точности вычисления энтропии.

2. Часто возникают трудности, как с однозначным выделением у сложной системы, имеющей бесконечное число состояний, фиксированного конечного множества состояний, так и с тем, что некоторые состояния заранее могут быть вообще не известны.

3. Информационная энтропия не рассчитана на случай многомерных систем. Поэтому затруднено моделирование взаимосвязей между элементами системы. А отсутствие возможности адекватного моделирования взаимосвязей приводит к проблеме выбора энтропийного критерия эффективности функционирования открытых систем. Ведь энтропия у них может, как возрастать, так и уменьшаться. Обычно критерий эффективности задается исходя из иных общих предпосылок, не учитывающих фактическое состояние системы.

4. Информационная энтропия не учитывает изменения дисперсии исследуемого процесса.

5. Формула (1.2.1) не позволяет объяснить наличие негэнтропии.

6. Имеется разница масштабов энтропии и информации, связанная с их принципиальным различием, т.к. энтропия – это мера множества тех состояний системы, о пребывании в которых система должна забыть, а информация – это мера множества тех состояний, о пребывании в которых система должна помнить.

7. Информационная энтропия малоприспособна для моделирования, т.к. неясно как связать используемые при ее описании вероятности с элементами системы и связями между ними.

Результатом этого является то, что существующие адекватные модели реальных систем на основе информационной энтропии, как правило, разработаны для решения частных задач. Указанные недостатки информационной энтропии потенциально могут быть устранены за счет использования дифференциальной энтропии (1.2.2). Длительное

время после ее изобретения К. Шенноном использование дифференциальной энтропии ограничивалось только частным случаем многомерного нормального распределения [8, 9], что ограничивало ее практическое использование в математическом моделировании сложных систем. Причина этого заключается в необходимости априорного знания или оценивания по достаточно малой выборке плотности распределения многомерной случайной величины.

В [3] изложен новый подход к энтропийному моделированию многомерных стохастических систем, позволяющий избежать оценивания плотности распределения многомерной случайной величины. Кроме этого, в этой работе был формализован для дифференциальной энтропии, как в динамике, так и в статике сформулированный И.Р. Пригожиным дуализм изменения энтропии: энтропия была представлена как сумма энтропий хаотичности и самоорганизации. Также в [3] на примере многомерных гауссовских стохастических систем показано, что предложенный подход на основе дифференциальной энтропии удовлетворяет всем признакам модели сложной системы и может использоваться для ее адекватного описания.

Однако остается нерешенным вопрос интерпретации энтропии в зависимости от области приложений [10]. Многими авторами [11–14] отмечается, что повышение эффективности функционирования систем можно рассматривать с позиции увеличения или уменьшения ее энтропии. Но оценка состояния системы и управление на основании энтропии как скалярной величины оказывается во многих случаях не реализуемым из-за разнонаправленного изменения энтропий хаотичности и самоорганизации. Представляется возможным устранение данного недостатка за счет рассмотрения энтропии как вектора, компонентами которого являются энтропии хаотичности и самоорганизации.

Отметим, что векторная форма представления дифференциальной энтропии впервые была предложена в [15] для случая многомерных гауссовских случайных величин. В [16] было предложено обобщение на случай произвольных непрерывных многомерных случайных величин и введены названия компонент векторной энтропии – «энтропия хаотичности» и «энтропия самоорганизации». Однако векторный подход для энтропийного моделирования не был реализован.

Выводы

1. Использование энтропийных моделей является актуальным и перспективным направлением при исследовании сложных стохастических систем различной природы.

2. В ходе анализа информационной энтропии выявлены существенные недостатки при ее использовании для моделирования сложных систем.

3. Анализ научных источников показал, что наиболее перспективным подходом в рамках энтропийного моделирования в задачах мониторинга состояния сложных систем является использование дифференциальной энтропии. Однако в известном подходе на основе дифференциальной энтропии не решен вопрос интерпретации энтропии в зависимости от области приложений. Это затрудняет применение энтропийного моделирования в задачах мониторинга состояния и управления сложными стохастическими системами.

4. Проведенный анализ проблематики энтропийного моделирования сложных систем позволил сформулировать гипотезу, позволяющую разработать единый подход [17].

Гипотеза: *Для адекватного моделирования и исследования многомерных стохастических систем дифференциальную энтропию следует рассматривать не в скалярной, а векторной форме в виде двух компонент – энтропий хаотичности и самоорганизации. В конкретных задачах мониторинга направление и величину энтропийного вектора следует задавать исходя из особенностей исследуемой системы.*

В частности, устойчивое развитие сложной стохастической системы согласно предлагаемому векторному энтропийному подходу состоит в одновременном росте разнообразия, возможностей для всех элементов этой системы и наличию тесной взаимосвязи между этими элементами; это проявляется в том, что с развитием сложной системы его энтропия хаотичности должна постепенно увеличиваться, а энтропия самоорганизации – уменьшаться.

1.2.2 Векторная энтропийная модель мониторинга и управления многомерными стохастическими системами

Опишем векторный подход к энтропийному моделированию сложных систем. На основе векторного представления энтропии предложена методология диагностики и мониторинга устойчивого развития стохастической системы.

1.2.2.1 Векторное представление энтропии как диагностическая модель сложной стохастической системы

С учетом сказанного выше сложную систему будем рассматривать как многомерную стохастическую систему. Представим эту стохастическую систему в виде многомерного непрерывного случайного вектора $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$, имеющего некоторую совместную плотность распределения вероятностей $p_{\mathbf{Y}}(x_1, \dots, x_m)$. Каждая компонента Y_i вектора \mathbf{Y} представляет собой одномерную случайную величину, характеризующую функционирование соответствующего элемента рассматриваемой системы. При этом элементы Y_i могут быть как взаимозависимыми (коррелированными в общем случае нелинейно), так и не зависеть друг от друга.

Дифференциальная энтропия (далее, энтропия) многомерной непрерывной случайной величины $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ была введена К. Шенноном в 1948 г. Она представляет собой функционал, заданный на множестве непрерывных распределений вероятностей, определяемый как

$$H(\mathbf{Y}) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\mathbf{Y}}(x_1, \dots, x_m) \ln p_{\mathbf{Y}}(x_1, \dots, x_m) dx_1 \dots dx_m,$$

где

$p_{\mathbf{Y}}(x_1, \dots, x_m)$ – совместная плотность распределения случайных величин Y_1, Y_2, \dots, Y_m .

В частном случае для энтропии одномерной непрерывной случайной величины X имеем формулу

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p_X(x) \ln p_X(x) dx,$$

где

$p_X(x)$ – плотность распределения вероятностей случайной величины X .

Доказано, что если все компоненты Y_i имеют дисперсии $\sigma_{Y_i}^2$, то энтропия $H(\mathbf{Y})$ случайного вектора \mathbf{Y} равна

$$H(\mathbf{Y}) = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Y_i} + \sum_{i=1}^m \kappa_i + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Y_k/Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2), \quad (1.2.3)$$

где

$\kappa_i = H(Y_i/\sigma_{Y_i})$ – энтропийный показатель типа закона распределения случайной величины Y_i ,

$R_{Y_k/Y_1Y_2\dots Y_{k-1}}^2$ – индексы детерминации регрессионных зависимостей,

$k = 2, 3, \dots, m$.

Первые два слагаемых $H(\mathbf{Y})_V = \sum_{i=1}^m H(Y_i) = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Y_i} + \sum_{i=1}^m \kappa_i$ представляют собой энтропию случайного вектора с взаимно независимыми компонентами и названы энтропией хаотичности, а третье – $H(\mathbf{Y})_R = \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Y_k/Y_1Y_2\dots Y_{k-1}}^2)$ – энтропией самоорганизации.

Отметим, что если случайный вектор \mathbf{Y} является гауссовским, то имеем частный случай, для которого [15]

$$H(\mathbf{Y})_V = \sum_{i=1}^m H(Y_i) = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Y_i} + m \ln \sqrt{2\pi e}, \quad H(\mathbf{Y})_R = \frac{1}{2} \ln |\mathbf{R}|,$$

где

\mathbf{R} – корреляционная матрица случайного вектора \mathbf{Y} .

Согласно (1.2.3) энтропия $H(\mathbf{Y})$ обладает триализмом. Существуют три причины ее изменения: изменение степени рассеяния ее компонент, изменение форм распределений ее компонент и изменение тесноты корреляционных связей между ее компонентами.

В [15, 16] было предложено векторное представление энтропии (1.2.3) в виде

$$\mathbf{h}(\mathbf{Y}) = (h_V; h_R) = (H(\mathbf{Y})_V; H(\mathbf{Y})_R). \quad (1.2.4)$$

Формула (1.2.4) предполагает рассмотрение энтропии $H(\mathbf{Y})$ не как скаляра, а в векторной форме, т.е. компоненты – энтропия хаотичности $H(\mathbf{Y})_V$ и энтропия самоорганизации $H(\mathbf{Y})_R$ – должны рассматриваться как самостоятельные величины.

Исследуем выражение (1.2.4) с позиции его использования в виде диагностической модели сложных стохастических систем.

Энтропия как диагностическая модель. В диагностической модели должна в определенной форме выражаться связь измеряемого вектора признаков \mathbf{x} с тестируемым свойством, которое в дальнейшем будет обозначаться как y [9]. Это означает, что должен быть раскрыт механизм преобразования $y = F(\mathbf{x})$.

Фактически построение диагностической модели состоит из двух задач. Во-первых, требуется определить вид функции $F(\mathbf{x})$. После установления или задания вида модели объекта решают задачу определения неизвестных параметров модели.

Укажем два основных требования к диагностическим моделям.

Во-первых, необходимо обеспечить максимальную точность и надежность конечного результата.

Во-вторых, это – интерпретируемость и лаконичность конечного результата.

Эти требования тесно взаимосвязаны друг с другом. Чем экономичнее по форме и содержательнее по смыслу преобразование $y = F(\mathbf{x})$ при обеспечении требуемой точности модели, тем более общие закономерности в экспериментальных данных выявляет данная модель. А, значит, тем устойчивее и надежнее количественная оценка диагностируемого показателя, получаемая с помощью преобразования $F(\mathbf{x})$.

Таким образом, от диагностической модели не требуется максимальной адекватности описания исследуемого объекта в целом, она предназначается только для описания степени отклонения состояния объекта от нормы.

Формула (1.2.3) позволяет упростить задачу определения энтропии случайного вектора, так как не требует знания или определения закона распределения многомерной случайной величины \mathbf{Y} , что практически нереализуемо в реальных задачах из-за ограниченности выборок экспериментальных данных. В целом нет формальных принципиальных проблем, связанных с нахождением энтропии по экспериментальным данным. Поэтому можно говорить о том, что модель (1.2.3) соответствует первому требованию к диагностическим моделям.

Согласно (1.2.3) параметрами энтропийной модели являются:

- средние квадратические отклонения σ_{Y_i} компонент Y_i ,
- энтропийные показатели k_i законов распределений, $i = 1, 2, \dots, m$,
- индексы детерминации $R_{Y_k/Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2$ регрессионных зависимостей между компонентами случайного вектора \mathbf{Y} , $k = 2, 3, \dots, m$.

Это конкретные показатели, характеризующие, отдельные компоненты случайного вектора, а значит, и соответствующие элементы исследуемой системы. По изменениям этих показателей на основе векторного представления энтропийной модели (1.2.4) можно будет делать лаконичные и интерпретируемые выводы при условии достижения поставленных в работе целей.

Энтропия как модель сложной системы. Рассмотрим соответствие выражений (1.2.3) и (1.2.4) модели сложной системы.

Адекватная модель сложной системы должна объяснять ее поведение, удовлетворять общесистемным закономерностям и позволять моделировать воздействия

на нее с помощью управляющих переменных. Рассмотрим соотношения (1.2.3) и (1.2.4) с этих позиций.

1. Наличие основных системных закономерностей.

Модель (1.2.3), (1.2.4) должна в том или ином виде описывать основные системные закономерности. Рассмотрим каждую из этих закономерностей, описанных в литературе по системному анализу [18].

Целостность и аддитивность.

Закономерность *целостности* проявляется в системе в возникновении новых обобщающих качеств, не свойственных образующим ее элементам. Существует два свойства целостности.

Во-первых, свойства системы (целого) Q не являются суммой свойств элементов (частей) q_i : $Q \neq \sum_{i=1}^m q_i$.

Во-вторых, свойства системы зависят от свойств ее элементов, т.е. $Q = f(q_1, q_2, \dots, q_m)$.

Энтропия (1.2.3) удовлетворяет закономерности целостности, т.к. $H(\mathbf{Y}) \neq \sum_{i=1}^m H(Y_i)$ и $H(\mathbf{Y}) = f(H(Y_1), H(Y_2), \dots, H(Y_m))$.

Аддитивность – двойственная по отношению к целостности закономерность. Она состоит в рассмотрении целостного объекта как состоящего из частей. При абсолютной аддитивности система представляется распавшейся на независимые элементы, т.е. $Q = \sum_{i=1}^m q_i$. В этом крайнем случае говорить о системе как таковой нельзя.

Для энтропии (1.2.3):

- абсолютная аддитивность достигается при $H(\mathbf{Y})_R = 1$, что соответствует взаимной независимости случайных величин Y_1, Y_2, \dots, Y_m ,
- абсолютная не аддитивность достигается при $H(\mathbf{Y})_R = 0$, что соответствует взаимной функциональной зависимости случайных величин Y_1, Y_2, \dots, Y_m .

Очевидно, что любая система всегда находится между крайними состояниями абсолютной целостности и абсолютной аддитивности, и ее состояние можно охарактеризовать степенью проявления этих свойств.

Изолированность и коммуникативность. Закономерность *изолированности* состоит в том, что совокупность объектов, образующих систему, и связи между ними можно отделить от их окружения и рассматривать изолированно. Изолированность

системы может быть достигнута в условиях закрытости системы. В рамках энтропийного подхода это означает, что система не обменивается с окружающей средой энергией, веществом и информацией.

Коммуникативность – это закономерность, двойственная относительно изолированности. Она характеризует взаимосвязанность системы со средой.

Очевидно, что влияние среды на систему состоит в воздействии на ее элементы, которые моделируются в виде отдельных взаимосвязанных компонент Y_i случайного вектора. В модели, описываемой выражениями (1.2.3), (1.2.4), это проявляется в изменении числовых характеристик закона распределения случайного вектора \mathbf{Y} , к которым относят совокупности средних квадратических отклонений σ_{Y_i} и энтропийных показателей κ_i компонент Y_i , а также индексов детерминации $R_{Y_k/Y_1Y_2\dots Y_{k-1}}^2$ регрессионных зависимостей между компонентами.

Идентифицируемость. Каждый элемент системы может быть отделен от остальных элементов, то есть идентифицирован. Очевидно, что по имеющимся выборочным данным можно оценить все числовые характеристики (σ_{Y_i} и κ_i) каждой компоненты Y_i многомерного вектора \mathbf{Y} в рамках энтропийной модели.

Множественность. Каждый элемент системы обладает собственным состоянием и поведением, отличным от состояния и поведения других элементов и системы в целом. Данная закономерность также учитывается в энтропийной модели, поскольку каждый элемент системы описывается отдельной случайной величиной. Зависимость между элементами системы является не функциональной, а статистической (корреляционной). Поэтому поведение любого элемента лишь частично зависит от других элементов системы.

Наблюдаемость. Эта означает, что все входы и выходы системы контролируемы наблюдателем или являются наблюдаемыми. В данном случае каждая компонента случайного вектора моделирует конкретную подсистему, которая является наблюдаемой (имеем многомерную выборку экспериментальных данных).

Неопределенность. У наблюдателя отсутствует возможность одновременно фиксировать все свойства и отношения элементов системы, он осуществляет исследование именно с целью их выявления. Действительно, это вытекает из случайности вектора \mathbf{Y} , который моделирует поведение сложной стохастической системы S .

Отображаемость и нетождественность отображения. С одной стороны, модель должна отражать все свойства и отношения исследуемой системы, которые нужны для решения задачи (*отражаемость*). Это проявляется в том, что каждая компонента

случайного вектора \mathbf{Y} моделирует поведение соответствующего элемента системы S . А, с другой, любая модель, в том числе энтропийная, не тождественна исследуемому объекту (*нетождественность отображения*).

Иерархичность. Иерархичность состоит в том, что более высокий иерархический уровень оказывает направляющее воздействие на подчиненный ему нижележащий уровень. В результате, у подчиненных членов иерархии появляются новые свойства, отсутствовавшие у них в изолированном состоянии. Данную закономерность применительно к энтропийной модели (1.2.3) можно интерпретировать следующим образом. Каждый i -й элемент моделируется компонентой Y_i случайного вектора. В свою очередь этот элемент может являться многомерной системой и состоять из собственных элементов, которые будут моделироваться другим случайным вектором.

Эквифинальность (потенциальная эффективность). Эта закономерность позволяет охарактеризовать предельные возможности систем. Применительно к открытой системе – это ее способность (в отличие от состояний равновесия в закрытых системах, полностью определяемых начальными условиями) достигать не зависящего от времени состояния, определяемого исключительно параметрами системы и не зависящего от ее исходных условий. В энтропийной модели под воздействием внешней среды система за счет изменения своих параметров (совокупности средних квадратических отклонений σ_{Y_i} и энтропийных показателей κ_i компонент Y_i , а также индексов детерминации $R_{Y_k/Y_1Y_2\dots Y_{k-1}}^2$ регрессионных зависимостей между компонентами) может варьировать свои свойства в пределах от абсолютно аддитивной до абсолютно целостной.

Закон «необходимого разнообразия». Создаваемая система должна иметь (способна создать в себе) разнообразие не менее чем разнообразие решаемой проблемы. Применительно к энтропийной модели эта закономерность обеспечивается за счет того, что, варьируя параметры модели (1.2.3), можно получить любое состояние многомерной системы \mathbf{Y} .

Историчность. В процессе функционирования любая система должна изменяться. Энтропийная модель (1.2.3) обеспечивает данную закономерность за счет изменения своих параметров, например, под воздействием внешней среды.

Закономерность самоорганизации. Во всех явлениях имеет место дуализм. С одной стороны, справедлив второй закон термодинамики, то есть стремление к возрастанию энтропии, к распаду, дифференциации, а с другой, наблюдаются неэнтропийные тенденции, лежащие в основе эволюции, развития.

Модель (1.2.3) объясняет, как рост энтропии, так и ее уменьшение. Рост (снижение) энтропии достигается за счет изменения степени рассеяния ее компонент, изменения форм распределений ее компонент и изменения тесноты корреляционных связей между ее компонентами.

2. Наличие управляющих переменных.

Воздействие на систему в рамках энтропийной модели осуществляется с помощью изменения параметров формулы (1.2.3). К таким параметрам следует отнести совокупности средних квадратических отклонений σ_{Y_i} и энтропийных показателей κ_i компонент Y_i , а также индексов детерминации $R_{Y_k/Y_1Y_2\dots Y_{k-1}}^2$ регрессионных зависимостей между компонентами.

Таким образом, установили, что энтропийная модель (1.2.3), (1.2.4) удовлетворяет всем признакам модели сложной системы и может использоваться для ее описания и эффективного управления.

1.2.2.2 Мониторинг состояния многомерных стохастических систем на основе векторного представления энтропии

Диагностическая модель должна объяснять изменения, происходящие в исследуемом объектах процессе функционирования, в динамике. Рассмотрим с этих позиций энтропию случайного вектора (1.2.3).

Пусть стохастическая система может быть адекватно представлена в виде случайного вектора \mathbf{Y} . Тогда на основе модели (1.2.3) можно осуществлять мониторинг состояния стохастической системы путем анализа изменения ее энтропии. Это можно сделать следующим образом. Будем считать, что два случайных вектора $\mathbf{Y}^{(1)} = (Y_1^{(1)}, Y_2^{(1)}, \dots, Y_m^{(1)})$ и $\mathbf{Y}^{(2)} = (Y_1^{(2)}, Y_2^{(2)}, \dots, Y_m^{(2)})$ соответствуют предыдущему и текущему периодам функционирования системы. Считаем, что дисперсии всех компонент случайного вектора конечны.

Для мониторинга многомерной стохастической системы будем придерживаться следующих этапов:

- 1) определение поведения системы, поиск зависимостей поведения системы от времени,
- 2) обнаружение характера изменения в системе («хаотичность» или «самоорганизация») в критических периодах,
- 3) на основании установленной причины, нахождение элементов системы,

оказавшихся причиной изменения ее состояния,

4) формулирование вывода о влиянии изменения в системе с учетом выявленных изменений поведения системы и их причин.

Случай 1. Рассмотрим вначале случай, когда распределения всех соответствующих компонент $Y_i^{(1)}, Y_i^{(2)}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) описываются однотипными законами распределения с некоторыми параметрами положения и масштаба, т.е. имеем $\forall i \kappa_i^{(1)} = \kappa_i^{(2)}$.

Тогда разность энтропий $\Delta H(\mathbf{Y}) = H(\mathbf{Y}^{(2)}) - H(\mathbf{Y}^{(1)})$ определяется по формуле

$$\Delta H(\mathbf{Y}) = \sum_{i=1}^m \ln \frac{\sigma_{Y_i^{(2)}}}{\sigma_{Y_i^{(1)}}} + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln \frac{1 - R_{Y_k^{(2)}/Y_1^{(2)} \dots Y_{k-1}^{(2)}}^2}{1 - R_{Y_k^{(1)}/Y_1^{(1)} \dots Y_{k-1}^{(1)}}^2}. \quad (1.2.5)$$

В результате при однотипности всех пар компонент $Y_i^{(1)}, Y_i^{(2)}$ вместо триализма имеем частный случай дуализма. А именно, энтропия может меняться только по двум причинам: из-за изменения рассеяния (дисперсий) компонент случайного вектора или за счет изменения тесноты корреляционной связи между этими компонентами. Из формулы (1.2.5) получим изменения энтропий хаотичности $\Delta H(\mathbf{Y})_V$ и самоорганизации $\Delta H(\mathbf{Y})_R$:

$$\Delta H(\mathbf{Y})_V = \sum_{i=1}^m \ln \frac{\sigma_{Y_i^{(2)}}}{\sigma_{Y_i^{(1)}}},$$

$$\Delta H(\mathbf{Y})_R = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln \frac{1 - R_{Y_k^{(2)}/Y_1^{(2)} \dots Y_{k-1}^{(2)}}^2}{1 - R_{Y_k^{(1)}/Y_1^{(1)} \dots Y_{k-1}^{(1)}}^2}.$$

В задачах диагностики состояния систем, наряду с оценкой изменения энтропий $H(\mathbf{Y})$, $H(\mathbf{Y})_V$ и $H(\mathbf{Y})_R$ в целом, нужно оценивать вклад каждой компоненты в энтропию. Вклад любой l -й компоненты в изменение энтропии хаотичности:

$$\Delta H(\mathbf{Y})_{V,l} = \ln \frac{\sigma_{Y_l^{(2)}}}{\sigma_{Y_l^{(1)}}}, \quad l = 1, 2, \dots, m.$$

Поскольку

$$R_{Y_m/Y_1 Y_2 \dots Y_{m-1}}^2 \geq R_{Y_m/Y_1 Y_2 \dots Y_{m-2}}^2 \geq \dots \geq R_{Y_m/Y_1}^2,$$

то предельный индекс детерминации $R_{Y_m/Y_1 Y_2 \dots Y_{m-1}}^2$ может быть использован для описания зависимости компоненты Y_m от остальных $(m - 1)$ компонент. Поэтому оценивать вклад произвольной l -й компоненты в изменение энтропии самоорганизации можно будет через предельные значения индексов детерминации:

$$\Delta H(\mathbf{Y})_{R,l} = \frac{1}{2} \ln \frac{1 - R_{Y_l^{(2)}/Y_1^{(2)} \dots Y_{l-1}^{(2)} Y_{l+1}^{(2)} \dots Y_m^{(2)}}^2}{1 - R_{Y_l^{(1)}/Y_1^{(1)} \dots Y_{l-1}^{(1)} Y_{l+1}^{(1)} \dots Y_m^{(1)}}^2}, \quad l = 1, 2, \dots, m, \quad (1.2.6)$$

Суммарный вклад l -й компоненты в изменение энтропии случайного вектора определяется как $\Delta H(\mathbf{Y})_l = \Delta H(\mathbf{Y})_{V,l} + \Delta H(\mathbf{Y})_{R,l}$.

Отметим, что оценка вклада произвольной l -й компоненты в изменение энтропии самоорганизации через предельные значения индексов детерминации получена эмпирически и поэтому ее считаем приближенной.

Случай 2. Рассмотрим общий случай, когда распределения хотя бы одной пары компонент $Y_i^{(1)}, Y_i^{(2)}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) не описываются однотипными законами распределений. Тогда разность энтропий $\Delta H(\mathbf{Y}) = H(\mathbf{Y}^{(2)}) - H(\mathbf{Y}^{(1)})$ равна

$$\Delta H(\mathbf{Y}) = \sum_{i=1}^m \ln \frac{\sigma_{Y_i^{(2)}}}{\sigma_{Y_i^{(1)}}} + \sum_{i=1}^m (\kappa_i^{(2)} - \kappa_i^{(1)}) + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln \frac{1 - R_{Y_k^{(2)}/Y_1^{(2)} \dots Y_{k-1}^{(2)}}^2}{1 - R_{Y_k^{(1)}/Y_1^{(1)} \dots Y_{k-1}^{(1)}}^2}. \quad (1.2.7)$$

Как видно из (1.2.7), выражение для изменения энтропии самоорганизации $\Delta H(\mathbf{Y})_R$ останется тем же, что и для случая 1, а изменение энтропии хаотичности $\Delta H(\mathbf{Y})_V$ будет равно

$$\Delta H(\mathbf{Y})_V = \sum_{i=1}^m \ln \frac{\sigma_{Y_i^{(2)}}}{\sigma_{Y_i^{(1)}}} + \sum_{i=1}^m (\kappa_i^{(2)} - \kappa_i^{(1)}).$$

Поскольку в этом случае $\kappa_i^{(2)} - \kappa_i^{(1)} \neq 0$, то появляется третий фактор изменения энтропии из-за изменения типа распределения.

Например, разность между энтропийными показателями нормального распределения и распределения Лапласа равна $\Delta\kappa = \ln \sqrt{2\pi e} - \ln e\sqrt{2} = \ln \sqrt{\frac{\pi}{e}}$. Это изменение эквивалентно увеличению дисперсии случайной величины в $\pi/e = 1,16$ раз.

Таким образом, случай сохранения типов законов распределений компонент случайного вектора проще реализуем и не требует определения энтропийных показателей компонент. Но нарушение этого условия может привести к значительным ошибкам в оценивании динамики энтропии, а, значит, и к снижению достоверности диагноза о состоянии системы.

Поэтому оценка вклада любой l -й компоненты в изменение энтропии хаотичности, учитывающая изменение типа распределения определяется по формуле

$$\Delta H(\mathbf{Y})_{V,l} = \ln \frac{\sigma_{Y_l^{(2)}}}{\sigma_{Y_l^{(1)}}} + \kappa_l^{(2)} - \kappa_l^{(1)}, \quad l = 1, 2, \dots, m.$$

Наряду с оцениванием изменения энтропии в задачах диагностики и управления важно оценивать вклад в энтропию каждой из компонент случайного вектора.

Определение 1. Введем случайный вектор $\mathbf{Y}_m^- = (Y_1, Y_2, \dots, Y_{m-1})$. Тогда изменение энтропий $H(\mathbf{Y})$, $H(\mathbf{Y})_V$ и $H(\mathbf{Y})_R$ системы за счет добавления в нее компоненты Y_m равно

$$\Delta H(Y_m) = H(\mathbf{Y}) - H(\mathbf{Y}_m^-), \quad (1.2.8)$$

$$\Delta H(Y_m)_V = H(\mathbf{Y})_V - H(\mathbf{Y}_m^-)_V = \ln \sigma_{Y_m} + \kappa_m, \quad (1.2.9)$$

$$\Delta H(Y_m)_R = H(\mathbf{Y})_R - H(\mathbf{Y}_m^-)_R = \frac{1}{2} \ln(1 - R_{Y_m/Y_1 Y_2 \dots Y_{m-1}}^2). \quad (1.2.10)$$

Для гауссовского случайного вектора $\tilde{\mathbf{Y}}$ формула (1.2.8) и (1.2.9) примут вид

$$\Delta H(\tilde{Y}_m)_V = H(\tilde{\mathbf{Y}})_V - H(\tilde{\mathbf{Y}}_m^-)_V = \ln \sigma_{\tilde{Y}_m} + \ln \sqrt{2\pi e}, \quad (1.2.1.1)$$

$$\Delta H(\tilde{Y}_m)_R = H(\tilde{\mathbf{Y}})_R - H(\tilde{\mathbf{Y}}_m^-)_R = \frac{1}{2} \ln \frac{|\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{Y}}}|}{|\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{Y}}_m^-}|}, \quad (1.2.1.2)$$

где

$\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{Y}}}$, $\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{Y}}_m^-}$ – корреляционные матрицы гауссовских векторов \mathbf{Y} и $\tilde{\mathbf{Y}}_m^-$.

Наряду с вкладом в энтропию системы одной компоненты, аналогично формулам (1.2.8)–(1.2.12) можно оценивать вклад и группы компонент. В результате находятся компоненты, оказавшие наибольшее влияние на энтропию системы.

Выше было отмечен приближенный характер оценка вклада произвольной l -й компоненты в изменение энтропии самоорганизации через предельные значения индексов детерминации. Найдем точный вклад произвольной компоненты Y_l в изменение энтропии самоорганизации.

Согласно (1.2.10) и (1.2.7)

$$\begin{aligned} \Delta H(\mathbf{Y})_{R,m} &= \Delta H(Y_m^{(2)})_R - \Delta H(Y_m^{(1)})_R = \\ &= \frac{1}{2} \ln \left(1 - R_{Y_m^{(2)}/Y_1^{(2)} Y_2^{(2)} \dots Y_{m-1}^{(2)}}^2 \right) - \frac{1}{2} \ln \left(1 - R_{Y_m^{(1)}/Y_1^{(1)} Y_2^{(1)} \dots Y_{m-1}^{(1)}}^2 \right) = \\ &= \frac{1}{2} \ln \frac{1 - R_{Y_m^{(2)}/Y_1^{(2)} Y_2^{(2)} \dots Y_{m-1}^{(2)}}^2}{1 - R_{Y_m^{(1)}/Y_1^{(1)} Y_2^{(1)} \dots Y_{m-1}^{(1)}}^2}. \end{aligned}$$

Поскольку в формуле (1.2.3) порядок расположения компонент не имеет значения, то в качестве последней m -й компоненты можно рассматривать любую. Таким образом, доказали, что формула (1.2.6) точно оценивает вклад произвольной l -й компоненты в изменение энтропии самоорганизации. Поэтому дадим определение вклада любой компоненты в изменение энтропии многомерной стохастической системы.

Определение 2. Будем считать, что два случайных вектора $\mathbf{Y}^{(1)} = (Y_1^{(1)}, Y_2^{(1)}, \dots, Y_m^{(1)})$ и $\mathbf{Y}^{(2)} = (Y_1^{(2)}, Y_2^{(2)}, \dots, Y_m^{(2)})$ соответствуют предыдущему и текущему периодам функционирования системы. Считаем, что дисперсии всех компонент случайного вектора конечны. Тогда вклад любой компоненты Y_l в изменение $\Delta H(\mathbf{Y})_l$ энтропии системы равен

$$\Delta H(\mathbf{Y})_l = \Delta H(\mathbf{Y})_{V,l} + \Delta H(\mathbf{Y})_{R,l}, \quad l = 1, 2, \dots, m, \quad (1.2.13)$$

$$\Delta H(\mathbf{Y})_{V,l} = \ln \frac{\sigma_{Y_l^{(2)}}}{\sigma_{Y_l^{(1)}}} + \kappa_l^{(2)} - \kappa_l^{(1)}, \quad (1.2.14)$$

$$\Delta H(\mathbf{Y})_{R,l} = \frac{1}{2} \ln \frac{1 - R_{Y_l^{(2)}/Y_1^{(2)} \dots Y_{l-1}^{(2)} Y_{l+1}^{(2)} \dots Y_m^{(2)}}^2}{1 - R_{Y_l^{(1)}/Y_1^{(1)} \dots Y_{l-1}^{(1)} Y_{l+1}^{(1)} \dots Y_m^{(1)}}^2}, \quad (1.2.15)$$

где

$\Delta H(\mathbf{Y})_{V,l}$, $\Delta H(\mathbf{Y})_{R,l}$ – вклады компоненты Y_l в изменение энтропий хаотичности и самоорганизации, соответственно.

Для гауссовских случайных векторов $\tilde{\mathbf{Y}}^{(1)}$ и $\tilde{\mathbf{Y}}^{(2)}$ формулы (1.2.14) и (1.2.15) будут иметь вид

$$\Delta H(\tilde{\mathbf{Y}})_{V,l} = \ln \frac{\sigma_{\tilde{Y}_l^{(2)}}}{\sigma_{\tilde{Y}_l^{(1)}}}, \quad (1.2.16)$$

$$\Delta H(\tilde{\mathbf{Y}})_{R,l} = \frac{1}{2} \ln \frac{1 - \rho_{\tilde{Y}_l^{(2)}/\tilde{Y}_1^{(2)} \dots \tilde{Y}_{l-1}^{(2)} \tilde{Y}_{l+1}^{(2)} \dots \tilde{Y}_m^{(2)}}^2}{1 - \rho_{\tilde{Y}_l^{(1)}/\tilde{Y}_1^{(1)} \dots \tilde{Y}_{l-1}^{(1)} \tilde{Y}_{l+1}^{(1)} \dots \tilde{Y}_m^{(1)}}^2}, \quad (1.2.17)$$

где

$$\rho_{\tilde{Y}_m^{(2)}/\tilde{Y}_1^{(2)} \dots \tilde{Y}_{m-1}^{(2)}}^2 = 1 - \frac{\Delta_{\tilde{Y},m}}{\Delta_{\tilde{Y},m-1}},$$

$\Delta_{\tilde{Y},m}$, $\Delta_{\tilde{Y},m-1}$ – угловые миноры корреляционной матрицы $\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{Y}}}$.

Формулы (1.2.5), (1.2.7)–(1.2.17) позволяют проводить контроль состояния стохастической системы. Отслеживая изменение $H(\mathbf{Y})$ энтропии в целом и ее составляющих, можно сделать выводы о состоянии исследуемой стохастической системы и обнаружить зарождающиеся тенденции изменения состояния.

Анализ поведения каждой из компонент случайного вектора \mathbf{Y} позволит выявить те из них, которые оказали наибольшее влияние на изменение энтропии $H(\mathbf{Y})$ и энтропий хаотичности и самоорганизации, а значит, и на изменение состояния многомерной стохастической системы.

Выводы

1. Предложен новый подход к энтропийному моделированию многомерных стохастических систем, основанный на векторном представлении энтропии случайного вектора.

2. Векторная энтропийная модель удовлетворяет всем признакам диагностической модели сложных систем и может использоваться для их адекватного описания.

3. Предложена методика включения в состав стохастических систем дискретных случайных компонент. Приведено ее описание и конкретный пример реализации.

4. Предложена методика оценки влияния отдельных элементов на изменение энтропии в моделях мониторинга и управления многомерных стохастических систем.

5. Предложено энтропийное управление многомерными стохастическими системами на основе векторной энтропийной модели.

6. Для распространенного класса гауссовских стохастических систем описана задача векторного энтропийного управления на основе входной информации в виде ковариационной матрицы случайного вектора.

7. Показано, что векторное энтропийное управление во многих случаях оказывается эффективнее скалярного управления. Приведен содержательный пример, иллюстрирующий преимущества векторного энтропийного управления перед скалярным.

8. Энтропийный мониторинг систем основан на векторной энтропийной модели. Он включает в себя оценку, контроль состояния, диагностику систем и на их основе выработку управленческих решений и рекомендаций.

К задачам энтропийного мониторинга сложной системы будем относить:

- оценку компонент энтропии системы – энтропий хаотичности и самоорганизации,
- оценку вклада каждого элемента системы в энтропию в статике и в динамике,
- диагностику текущего состояния системы, выявление тенденций и причин развития или деградации.

К задачам энтропийного управления сложной системы отнесем:

- выявление области векторной энтропии, соответствующей эффективному состоянию системы,
- решение оптимизационной задачи векторного энтропийного управления для перехода в установленную область энтропии,
- выработку управленческих рекомендаций на основе полученного решения с целью улучшения состояния исследуемой системы.

1.2.3 Векторное энтропийное моделирование устойчивого развития городов

Данный результат практического использования векторного энтропийного управления изложен в работах [18–20]. По данным статистической отчетности Росстата был проведен анализ. Из множества основных социально-экономических показателей

городов сформирована система из 12 признаков, характеризующих все основные стороны инфраструктуры города:

- 1) естественный прирост на 1000 человек населения,
- 2) доля работающего населения в организациях, %,
- 3) среднемесячная номинальная начисленная заработная плата, тыс. руб.,
- 4) доля пенсионеров, состоящих на учете в органах социальной защиты населения, %,
- 5) общая площадь жилых помещений, приходящаяся в среднем на одного городского жителя (на конец года), м²,
- 6) численность воспитанников в дошкольных образовательных организациях, тыс. чел.,
- 7) численность врачей на 1000 населения, чел.,
- 8) число зарегистрированных преступлений, на тыс. чел.,
- 9) объем промышленной продукции, тыс. руб. на чел.,
- 10) объем работ, выполненных по договорам строительного подряда, тыс. руб. на чел.,
- 11) оборот розничной торговли, тыс. руб. на чел.,
- 12) инвестиции в основной капитал, млн. руб.

Формирование данной системы показателей выполнялось по следующему принципу: рассматривалась парная корреляция между всеми имеющимися основными социально-экономическими показателями городов, которых порядка двадцати. Оказалось, что ряд показателей очень сильно коррелированы (коэффициенты парной корреляции превышали уровень 0,9). Из таких групп взаимно коррелированных показателей оставляли по одному показателю. Приоритет отдавался тому показателю, который более содержательно характеризовал город как социально-экономическую систему.

Учет инфляции был проведен путем пересчета в цены 2015 года на основе индексов потребительских цен, разная численность населения городов была учтена переходом к относительным показателям на одного жителя. Малость выборок позволяет использовать представление системы в виде гауссовского случайного вектора.

При расчете энтропии оценки выполнялись по периодам в 13 лет. Этот период оказался оптимальным в смысле статистического сглаживания, с одной стороны, и учета динамики изменения энтропии, с другой. Энтропия оценивалась в векторной форме.

Поскольку выборка оказалась достаточно малой, то отклонения эмпирических распределений рассматриваемых признаков от нормального распределения практически нельзя установить.

На рисунках 1.2.1–1.2.4 приведены графики изменения энтропий хаотичности и самоорганизации в Екатеринбурге, Москве и Санкт-Петербурге, соответственно. Анализ графиков на рисунках 1.2.1–1.2.4 согласно энтропийной модели позволяет сделать следующие выводы.

1. Изначально Москва находилась на более высокой стадии развития, поскольку имела большее многообразие функционирования инфраструктур (наибольшее значение энтропии хаотичности) и, одновременно, демонстрировала более высокий уровень взаимодействия между инфраструктурами (минимальное значение энтропии самоорганизации). Санкт-Петербург занимал вторую позицию, как по степени разнообразия функционирования инфраструктур, так и по взаимодействию между ними.

2. Екатеринбург в начальном периоде занимал третье место. Но в течение анализируемого периода Екатеринбург показал наилучшую динамику развития и практически сравнялся с Санкт-Петербургом по уровням энтропий хаотичности и самоорганизации. Москва как многомерная стохастическая система не показала развития. На графике рисунка 1.2.2 виден цикл, т.е. система вернулась в исходное состояние.

3. На графиках явно видны характерные зоны нестабильности, соответствующие мировому финансовому кризису 2008–2009 годов, периоду снижения темпов роста валового внутреннего продукта с 2012 года и периоду санкций, с 2014 года.

4. Из графиков на рисунке 1.2.4 видим, что общая энтропия по всем трем мегаполисам в рассматриваемом периоде практически не изменилась. Это свидетельствует о необходимости рассмотрения энтропии многомерной стохастической системы, не в скалярной, а в векторной форме

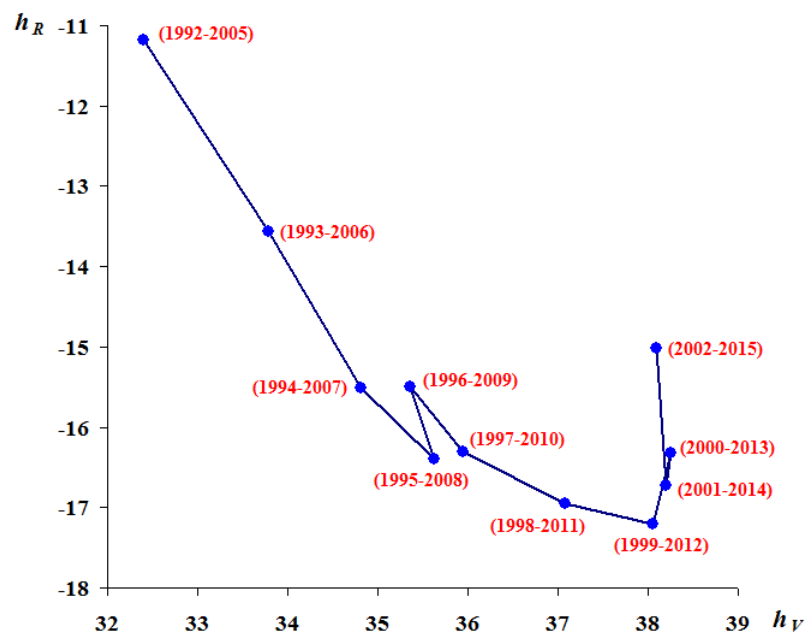


Рисунок 1.2.1 – Изменение энтропий хаотичности и самоорганизации в Екатеринбурге

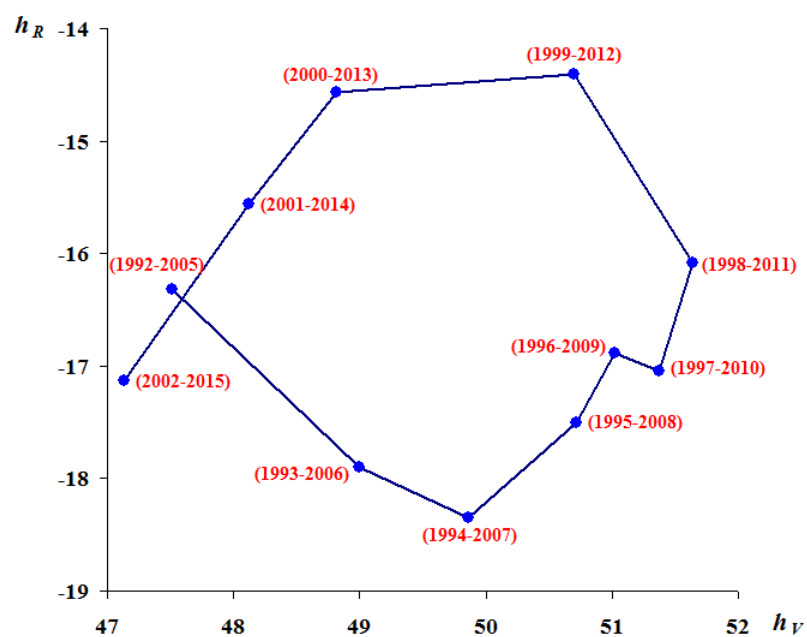


Рисунок 1.2.2 – Изменение энтропий хаотичности и самоорганизации в Москве

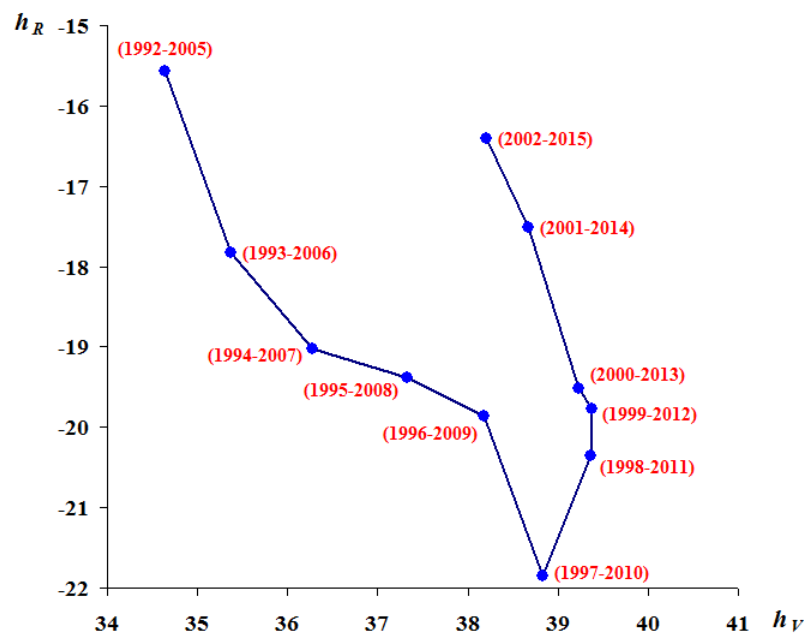


Рисунок 1.2.3 – Изменение энтропий хаотичности и самоорганизации в Санкт-Петербурге

На рисунке 1.2.4 показана динамика энтропии (2) для всех трех мегаполисов.

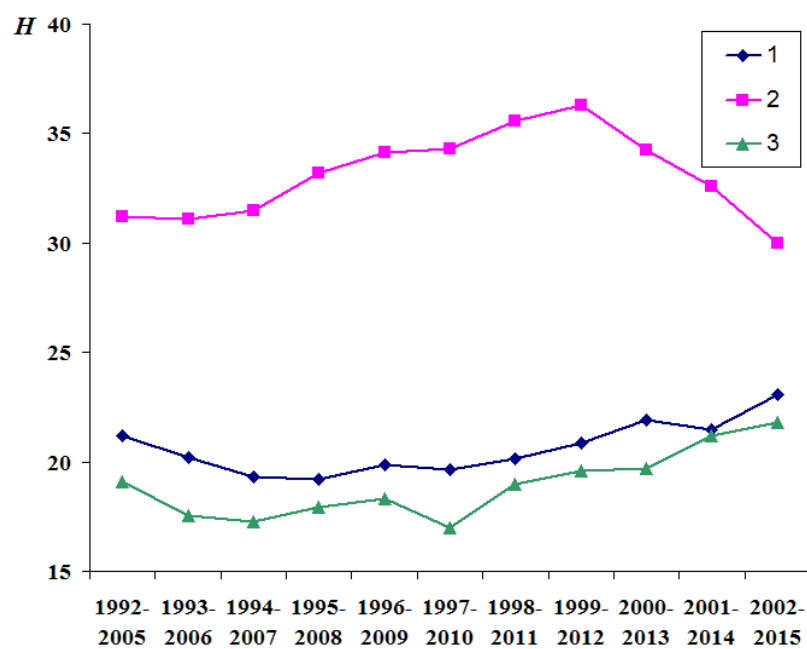


Рисунок 1.2.4 – Динамика энтропии: 1 – в Екатеринбурге, 2 – в Москве, 3 – в Санкт-Петербурге

Используя формулы (1.2.8–1.2.12) мы можем оценить влияние каждого показателя на энтропию хаотичности, самоорганизации и на общую энтропию в целом. Результаты вычислений визуализированы в виде диаграмм.

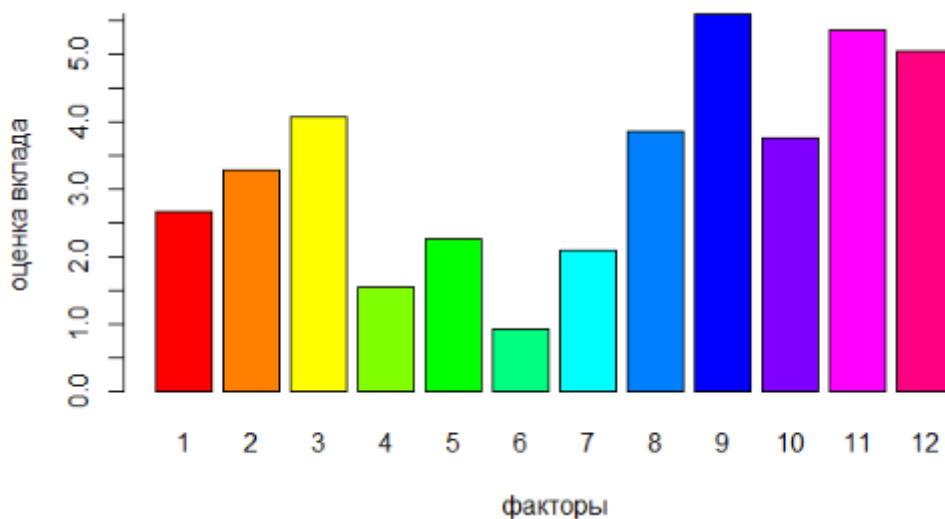


Рисунок 1.2.5 – Абсолютное влияние компонент на энтропию хаотичности в Екатеринбурге на весь период

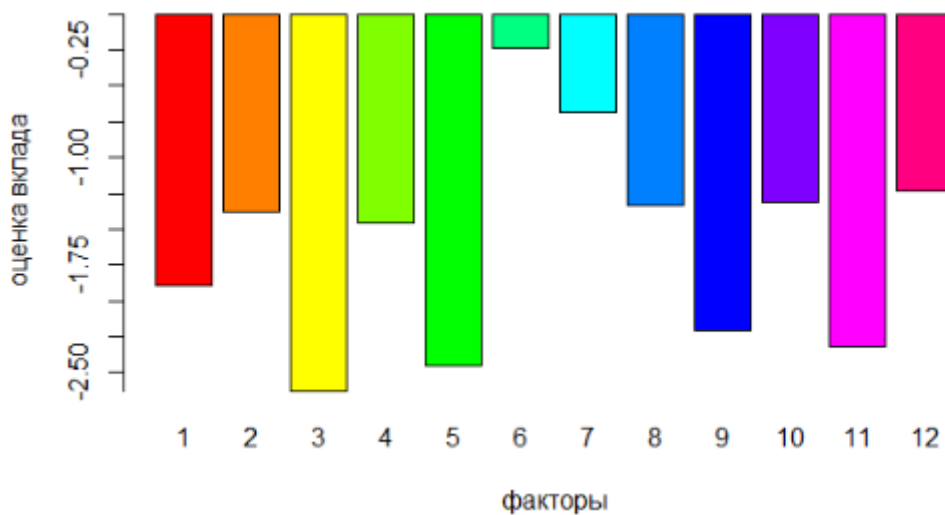


Рисунок 1.2.6 – Абсолютное влияние компонент на энтропию самоорганизации в Екатеринбурге на весь период

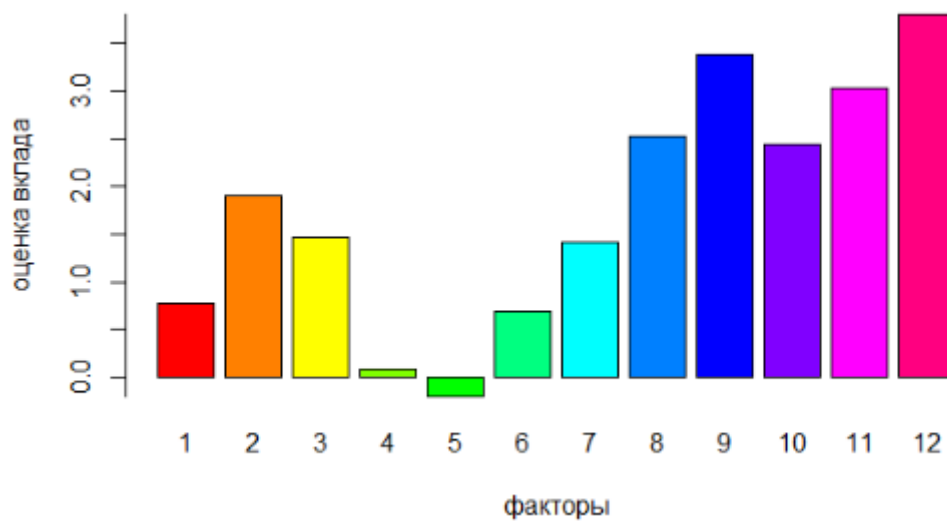


Рисунок 1.2.7 – Абсолютное влияние компонент на общую энтропию в Екатеринбурге на весь период

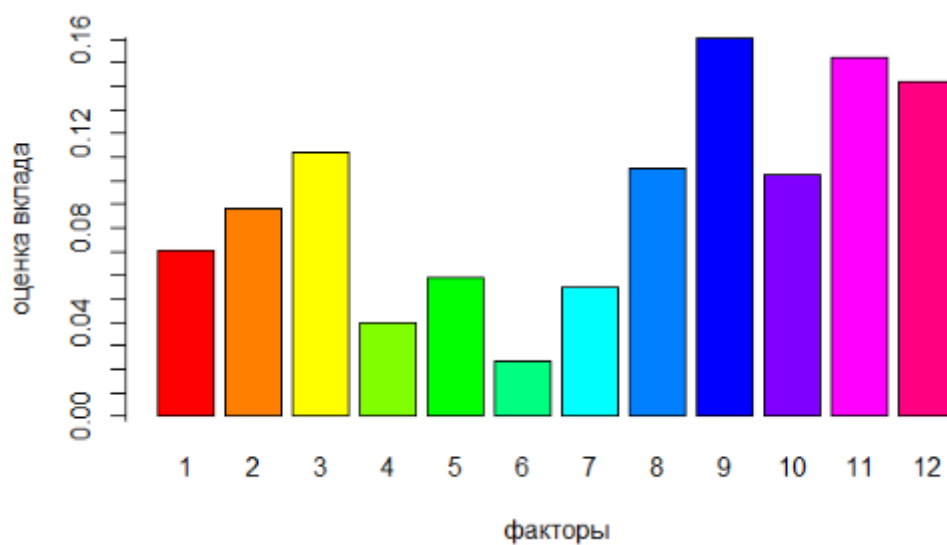


Рисунок 1.2.8 – Относительное влияние компонент на энтропию хаотичности в Екатеринбурге на весь период

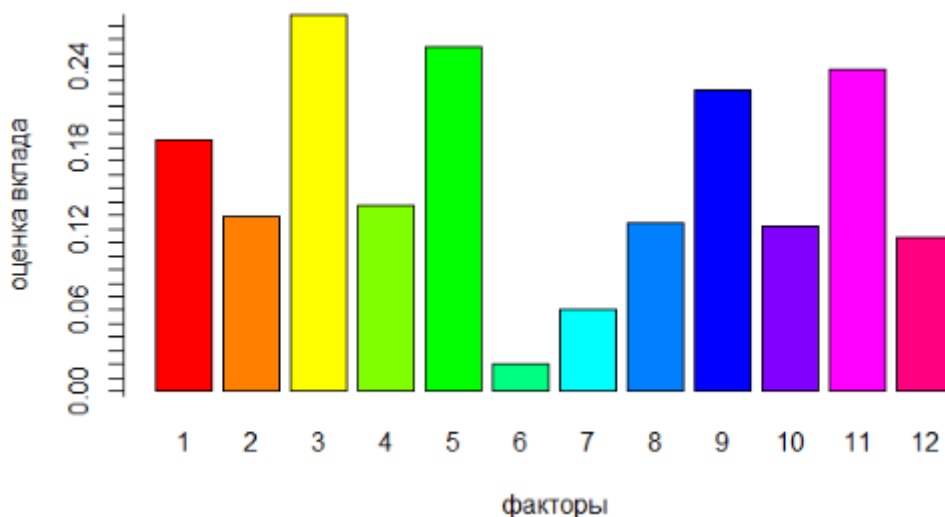


Рисунок 1.2.9 – Относительное влияние компонент на энтропию самоорганизации в Екатеринбурге на весь период

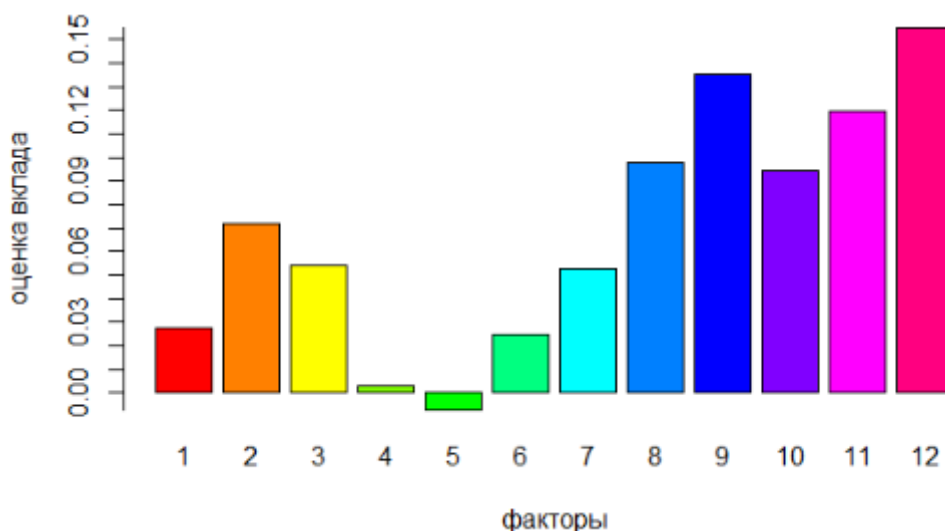


Рисунок 1.2.10 – Относительное влияние компонент на общую энтропию в Екатеринбурге на весь период

На основе анализа рисунков 1.2.5–1.2.10 можем сделать вывод, что на энтропию хаотичности и на общую энтропию в основном повлияли объем промышленной продукции (9-й показатель), оборот розничной торговли (11-й показатель) и инвестиции в основной капитал (12-й показатель). Это означает, что у этих компонент самый большой разброс (дисперсия). На энтропию самоорганизации самое большое влияние имеют среднемесячная номинальная начисленная заработная плата (3-й показатель), общая площадь жилых помещений (5-й показатель), объем промышленной продукции (9-й показатель) и оборот розничной торговли (11-й показатель). При добавлении этих

компонент, энтропия самоорганизации уменьшается. Это означает, что эти компоненты наибольшим образом взаимосвязаны со всеми остальными компонентами.

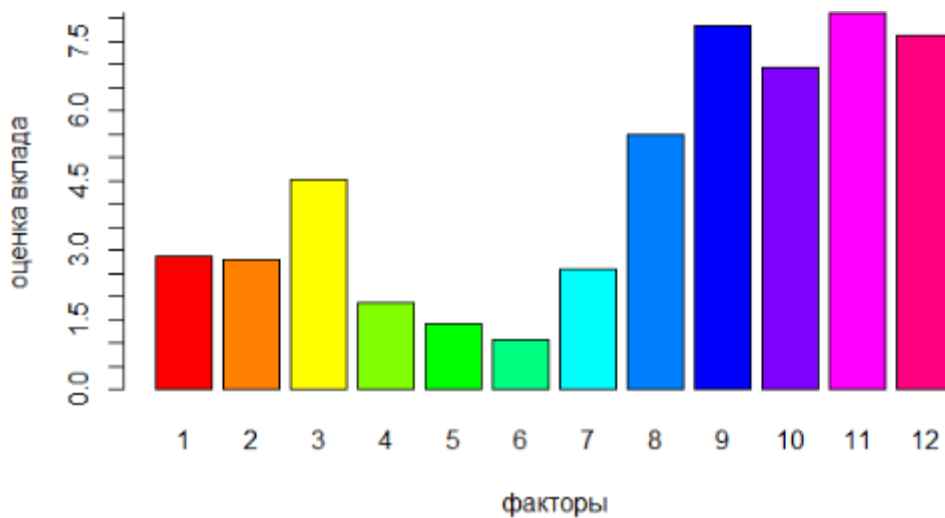


Рисунок 1.2.11 – Абсолютное влияние компонент на энтропию хаотичности в Москве

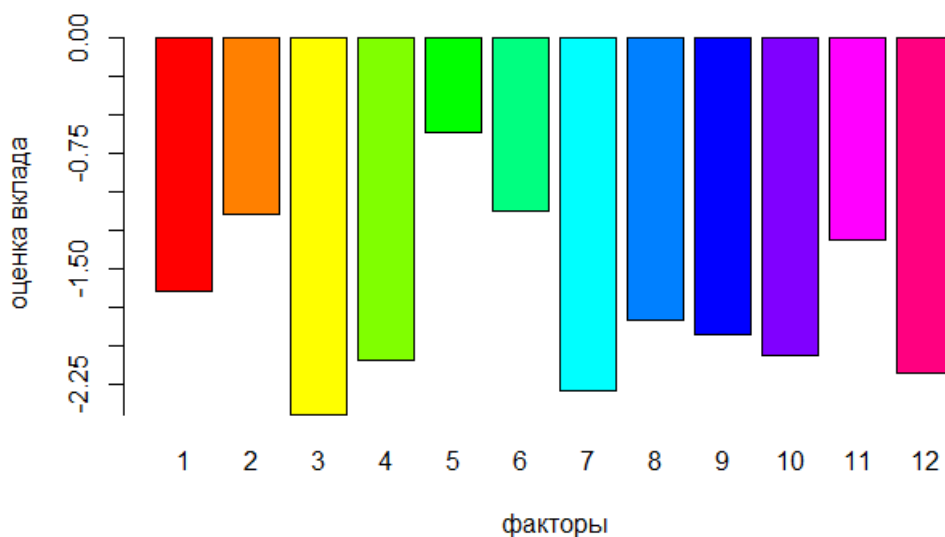


Рисунок 1.2.12 – Абсолютное влияние компонент на энтропию самоорганизации в Москве

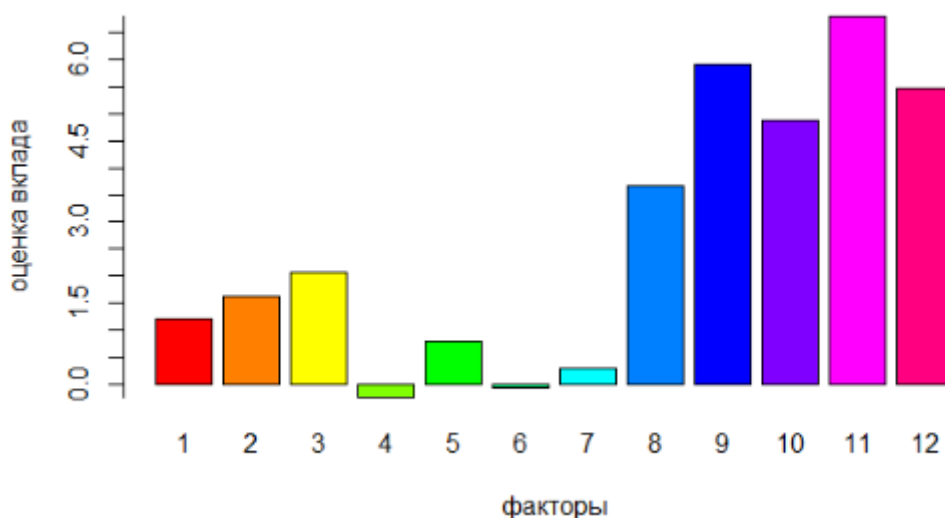


Рисунок 1.2.13 – Абсолютное влияние компонент на общую энтропию в Москве

Анализируя рисунки 1.2.11–1.2.13, можно сделать заключение, что в Москве на энтропию хаотичности и на общую энтропию главным образом влияют те же самые компоненты, что и в Екатеринбурге. На энтропию самоорганизации почти все компоненты имеют одинаковый вклад.

Используя формулы (1.2.13–1.2.17), можно оценить влияние каждого показателя на динамику энтропии. Результаты вычислений для периодов 1995–2008 гг. и 1996–2009 гг. в Екатеринбурге, которые соответствуют точкам, где вектор энтропии меняет направление (см. рисунок 1.2.1), приведены на рисунках 1.2.14–1.2.16.

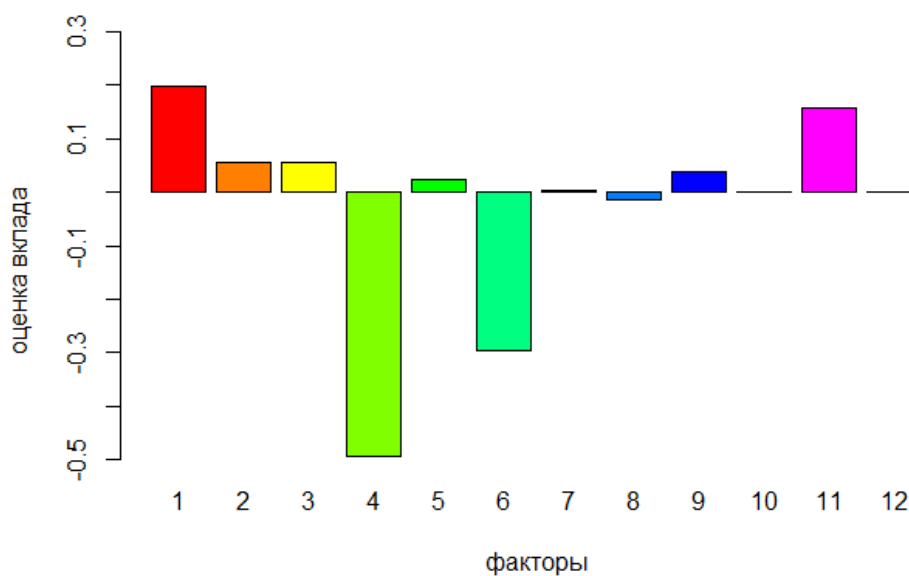


Рисунок 1.2.14 – Абсолютное влияние компонент на изменение энтропии хаотичности для периодов 1995–2008 гг. и 1996–2009 гг. в Екатеринбурге

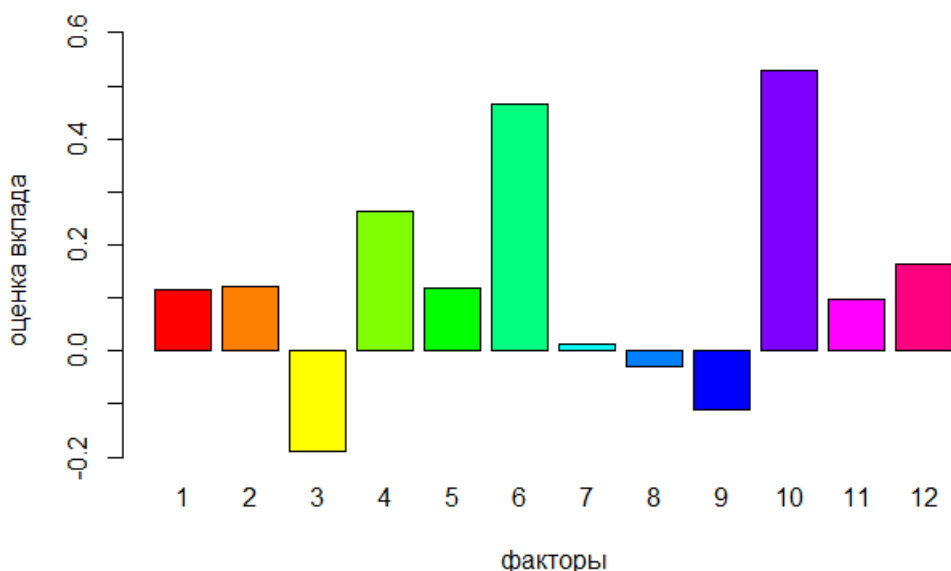


Рисунок 1.2.15 – Абсолютное влияние компонент на изменение энтропии самоорганизации для периодов 1995-2008 гг. и 1996-2009 гг. в Екатеринбурге

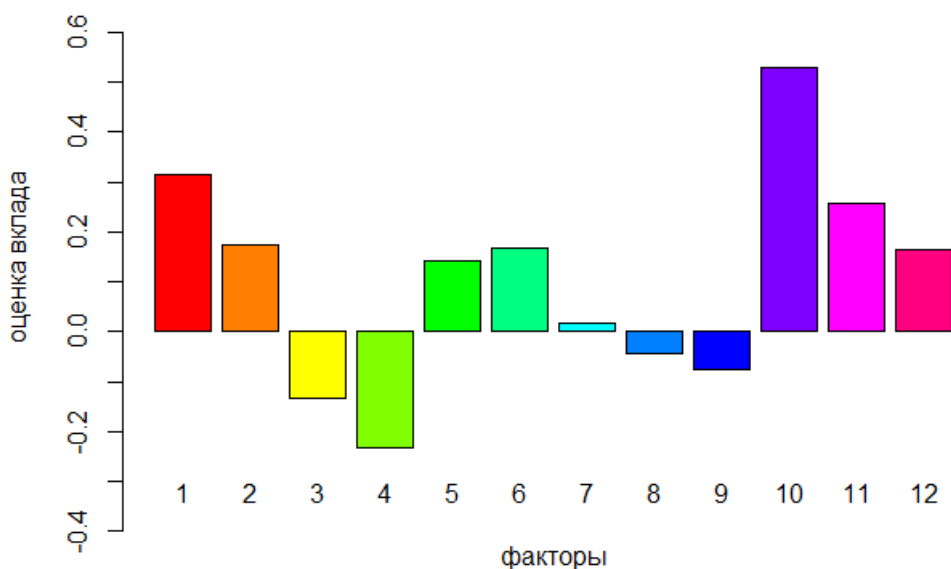


Рисунок 1.2.16 – Абсолютное влияние компонент на изменение общей энтропии для периодов 1995-2008 гг. и 1996-2009 гг. в Екатеринбурге

Анализируя рисунок 1.2.14, можно сказать, что энтропия хаотичности уменьшилась из-за 4-го (доля пенсионеров, состоящих на учете в органах социальной защиты населения) и 6-го (численность воспитанников в дошкольных образовательных организациях) компонентов. Это означает что сильно уменьшились дисперсии этих компонент: дисперсия 4-го показателя уменьшилась 2.8 раз, а дисперсия 6-го показателя 1.8 раз. Дисперсии всех остальных компонент изменились несущественно, либо вообще не изменились. Из рисунка 1.2.15 можно сделать вывод, что для периода 1996-2009 гг. энтропия самоорганизации увеличилась за счет 6-го признака (численность

воспитанников в дошкольных образовательных организациях) и 10-го признака (объем работ, выполненных по договорам строительного подряда) компонент. Это означает что эти компоненты стали более невзаимосвязанными со всеми остальными компонентами системы.

На рисунках 1.2.17–1.2.19 приведены диаграммы отражающие влияния компонент на изменения энтропий для периодов 1994–2007 гг. и 1995–2008 гг. в Москве, когда вектор энтропии отклоняется от направления соответствующее устойчивому развитию системы.

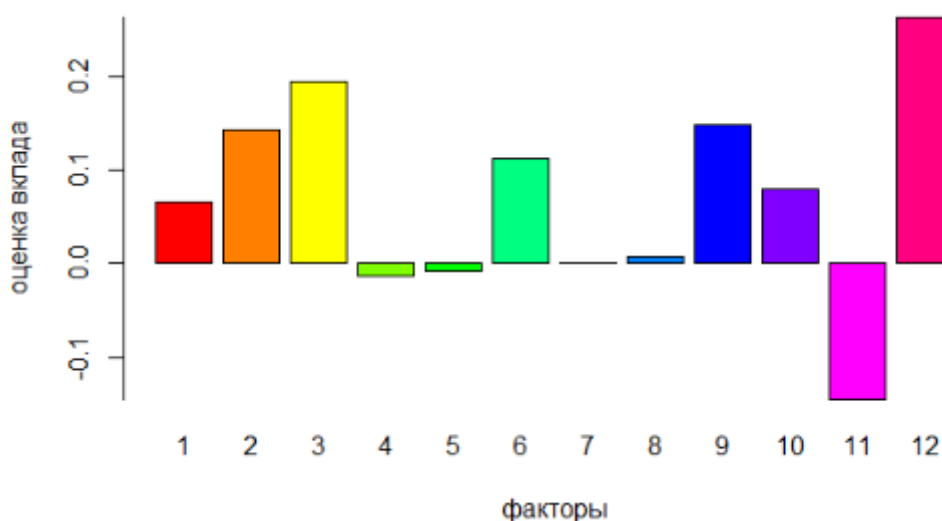


Рисунок 1.2.17 – Абсолютное влияние компонент на изменение энтропии хаотичности для периодов 1994–2007 гг. и 1995–2008 гг. в Москве

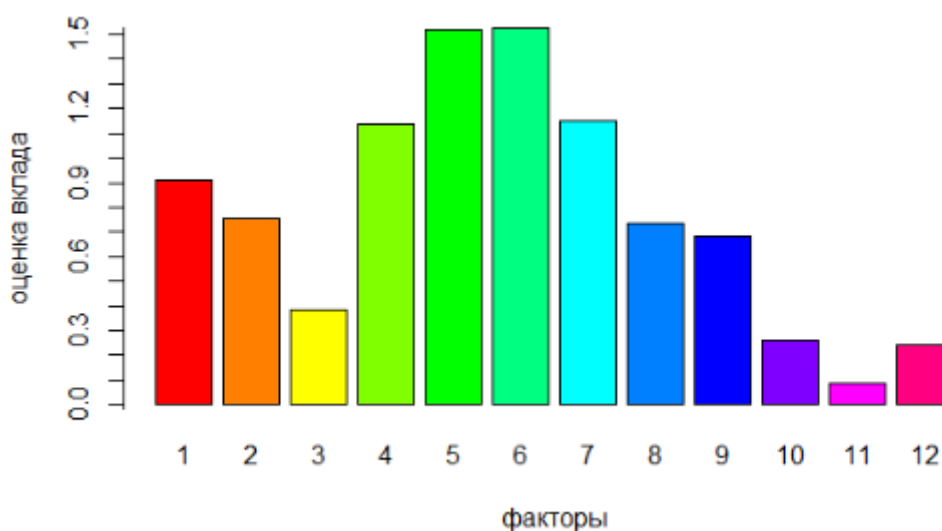


Рисунок 1.2.18 – Абсолютное влияние компонент на изменение энтропии самоорганизации для периодов 1994–2007 гг. и 1995–2008 гг. в Москве

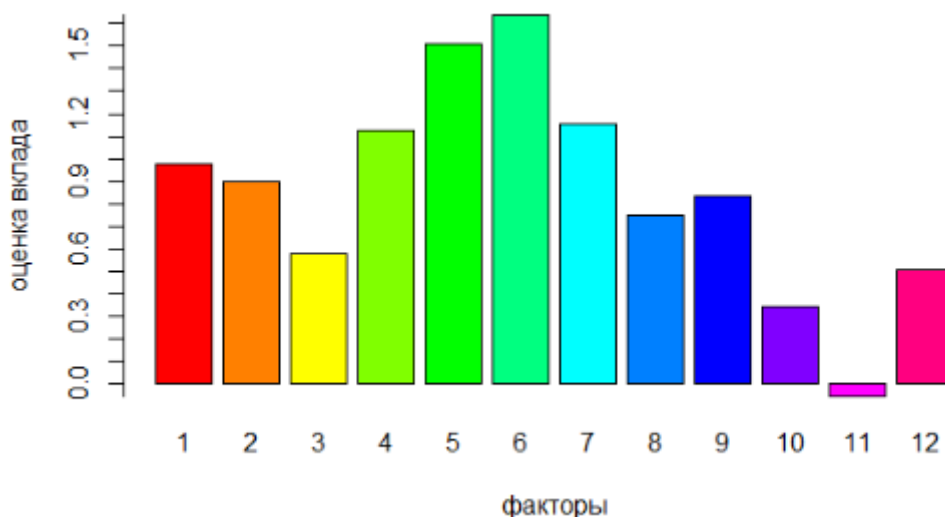


Рисунок 1.2.19 – Абсолютное влияние компонент на изменение общей энтропии для периодов 1994–2007 гг. и 1995–2008 гг. в Москве

Из рисунка 1.2.18 можно сделать вывод, что для Москвы для периода 1995-2008 гг. энтропия самоорганизации увеличилась за счет множества компонент. Это означает, что основная часть компонент системы стала функционировать менее согласованно. На рисунках 1.2.20–1.2.22 приведены диаграммы, отражающие влияния компонент на изменения энтропий для периодов 1997–2010 гг. и 1998–2011 гг. в Санкт-Петербурге. Здесь вектор энтропии также отклоняется от направления, соответствующего устойчивому развитию системы.

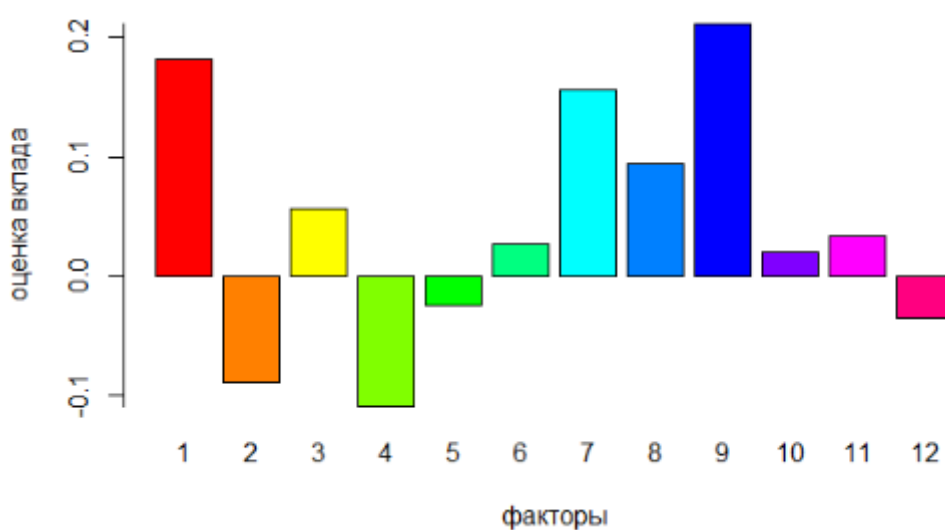


Рисунок 1.2.20 – Абсолютное влияние компонент на изменение энтропии хаотичности для периодов 1997–2010 гг. и 1998–2011 гг. в Санкт-Петербурге

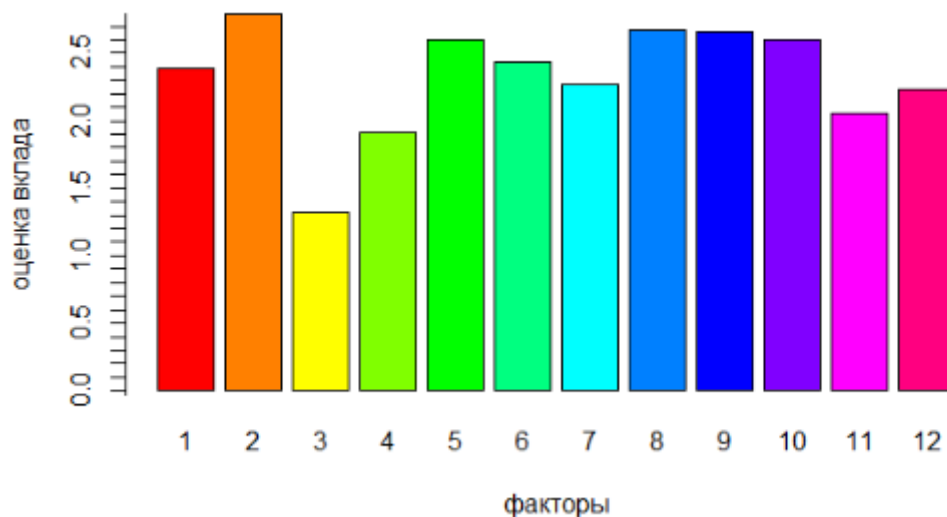


Рисунок 1.2.21 – Абсолютное влияние компонент на изменение энтропии самоорганизации для периодов 1997–2010 гг. и 1998–2011 гг. в Санкт-Петербурге

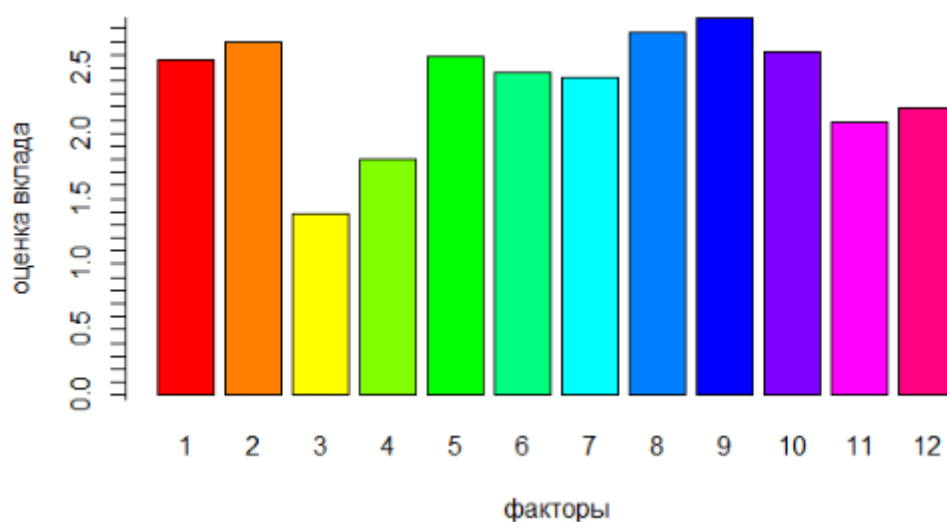


Рисунок 1.2.22 – Абсолютное влияние компонент на изменение общей энтропии для периодов 1997–2010 гг. и 1998–2011 гг. в Санкт-Петербурге

Здесь тоже, как и для Москвы, энтропия самоорганизации увеличилась за счет всех компонент системы, соответственно, можно заключить, что компоненты системы стали функционировать менее согласованно.

Выводы

1. Приведены примеры использования векторной энтропийной модели динамики для диагностики и контроля состояния систем из различных областей. В частности, применение векторной энтропийной модели динамики для моделирования медицинских и экономических систем.

2. Примеры свидетельствуют об универсальности энтропийной модели динамики для исследования различных систем.

3. Оценка энтропии, а также ее динамики в течение времени позволяет решать задачи контроля и диагностики многомерных стохастических систем.

1.3 Человеческий фактор в критичных инфраструктурах

1.3.1 Методологические подходы к оценке ЧФ в управлении безопасностью критичными инфраструктурами

Анализ научных журналов за период с 2016 по 2019 гг. показал, что многие антропогенные аварии связаны с человеческими ошибками (ЧО) и человеческими факторами (ЧФ). Методы их оценки в литературе указывают на важность анализа надежности человека в снижении и устранении его в ошибок. Особое внимание уделено когнитивным ошибкам и ЧФ, связанным с деятельностью человека в промышленности, необходимости включения ЧФ и эргономики в управление безопасностью. Обсуждаются когнитивные модели при анализе надежности человека промышленном обслуживании, а также интеграция ЧФ в оценку риска и управление ЧФ для снижения риска в промышленности. Подчеркивается, что сложность технических систем негативно влияет на способность оператора принимать решения в аварийных условиях [1].

Ниже проведем обзор ключевых исследований по основным направлениям исследований за последние три года. Из-за большого количества обозначений на английском языке, для удобства чтения, они повторяются с расшифровкой.

Оценка роли усталости человека в неопределенности измерений. Так в [2] получены формулы для оценки роли усталости человека в неопределенности измерений (определены индекс усталости и его максимум). Рассмотрен метод количественной оценки ЧО в неопределенности работы. Предлагается учитывать характеристики условий, которые обычно игнорируются стандартами, но которые могут влиять на неопределенность результатов.

Усталость и восстановление влияют, в первую очередь, на определение последовательности задач. Оператор действует в соответствии с антропометрией, опытом, отношением к работе, максимальной выносливостью и усталостью. Как правило, вероятность ЧО ниже в задачах с более длинным восстановлением и коротким прерыванием процедур. Простые задачи с большим усилием дают более высокую вероятность ошибки, чем сложные и более длинные задачи с легким усилием.

Оценка вероятности ЧО. Для оценки вероятностей ошибки человека (Human Error Probabilities – HEPs) предложена методика включения данных об отказах электрических компонентов в методику оценки и сокращения ошибок человека (Human Error Assessment And Reduction Technique - HEART) [3].

Существующий метод HEART содержит факторы, известные как *условия, вызывающие ошибки* (Error-Producing Conditions – EPCs), которые корректируют общую оценку НЕР с учетом конкретной оцениваемой ситуации. Выбор этих EPCs осуществляется по усмотрению эксперта. Зависимость от мнения экспертов широко распространена в аналогичных методах оценки НЕР, используемых во многих промышленных областях.

Предлагаемый метод включает факторы, основанные на наблюдаемых тенденциях в отказах электрических компонентов, для получения пересмотренного значения НЕР, которое может более эффективно инициировать действия по снижению риска (на основе наличия категорий компонентов или опасных условий с историей отказа из-за ЧО).

Данные, используемые для дополнительных факторов, являются результатом анализа отказов электронных компонентов, который включает в себя определение механизмов основных сбоев и анализ тенденций. Главные причины этих дефектов объяснялись электростатическими повреждениями или перенапряжениями (электрическими, механическими или термическими). Эти факторы (представляющие дефекты, вызванные пользователем) определяются количественно. Предлагаемая методика продемонстрирована на примере сравнения оригинального метода HEART и предложенной *модифицированной методики*.

Вероятность человеческой ошибки выражается произведением пяти коэффициентов [4]:

$$NEP = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 ,$$

где

K_1 – тип выполняемой задачи,

K_2 – время, доступное оператору для выполнения задачи,

K_3 – уровень опыта/характеристики оператора,

K_4 – психическое состояние оператора,

K_5 – преобладающие условия окружающей среды и эргономические условия.

Анализ ЧО на производстве. Отмечается [5], что в производственном секторе *человеческие ошибки* довольно распространены, хотя они не обязательно приводят к катастрофическим результатам. Предлагается структура вмешательства для проведения *анализа ошибок человека* на производстве. Отбор методик основывался на таких критериях, как простота, ориентированность на аналитику, доступность ресурсов, обоснованность, уровень производительности человека.

Рамки вмешательства включают:

- 1) статистический анализ данных – для выбора критических задач,
- 2) иерархический анализ задач (НТА - Hierarchical Task Analysis) – для представления задач,
- 3) систематический подход к уменьшению и прогнозированию ЧО (SHERPA - Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach) – для идентификации ошибок,
- 4) оценку и сокращение ЧО (HEART - Human Error Assessment and Reduction Technique) – для количественной оценки ошибки,
- 5) уменьшение ошибки.

Показано, как область общего анализа *надежности человека*, развитая, главным образом, для окружающих сред с высоким риском, может быть сформулирована просто для процесса анализа ЧО в производственном секторе. Единственное различие заключается в выборе критических задач, что в условиях высокого риска встречается редко.

Модель *анализа рисков* для оценки *человеческой ошибки* на промышленных предприятиях и в критических инфраструктурах обсуждается в работе [1]. Отмечается, что сложность производственных систем негативно влияет на способность оператора принимать решения в аварийных условиях. В результате исследования предложена *гибридная модель анализа вероятности человеческой ошибки*, получившая название *Emergency Human Error Analysis (EHEA)* и учитывающая все непредвиденные факторы, которые влияют на решения и действия оператора. Эта модель направлена на оценку вероятности человеческой ошибки в аварийных условиях на промышленных предприятиях и в критических инфраструктурах. Она основана на модели *SHERPA* и соотношении для *факторов формирования производительности* (Performance Shaping Factors Relationship). Предложенная модель может быть использована в профилактической фазе для анализа возможных сценариев аварий.

Методы предотвращения ЧО. Стандартные рабочие процедуры, управление усталостью, эргономика рабочего места и управление безопасностью являются примерами систем и методов предотвращения ЧО [1]. Понятно, что предотвращать ошибки гораздо дешевле, чем исправлять их. Предостережение «*унция профилактики стоит фунта лечения*» приписывается Бенджамину Франклину (1706–1790).

Правило стоимости ошибки 1-10-100 давно известно в литературе по управлению качеством: ошибка, исправленная при проектировании, стоит 1 единицу, если она

исправлена при строительстве – 10 единиц, а если исправлена при наличии у заказчика – 100 единиц.

Правило стоимости человеческой ошибки 1-10-100 говорит о том, что ЧО, которая прогрессирует через каждый уровень, стоит в десять раз больше, чем на предыдущем уровне. Это правило дает понять, что лучше всего обнаружить ЧО на ранней стадии. Решения, которые предотвращают ошибки, приносят гораздо большую ценность и производительность для компаний, чем решения, которые выявляют ошибки для исправления.

Для устранения ЧО, нужно изменить рабочие процессы так, чтобы ошибки были невозможны. С помощью решений для защиты от ошибок многие повторяющиеся задачи, которые зависят от памяти работника, встроены в сам рабочий процесс. Проверка ошибок освобождает время и умы рабочей силы для проведения более творческих и ценных мероприятий.

Защита от ошибок включает в себя также изменение *мышления* организаций (должна быть дана установка на проверку ошибок, которая способствует убеждению, что недопустимо даже небольшое количество дефектов продукта или работы).

Постоянное совершенствование с помощью анализа ЧФ – важная часть *плана безопасности*, чтобы найти новые возможности для проверки ошибок рабочего места.

Использование ЧФ для предотвращения ЧО. Понимание и использование ЧФ для предотвращения и коррекции ЧО дает большое преимущество в безопасности [6]. Лучшими решениями являются те, которые разработаны и встроены в способ работы. При этом конструкция задания защищает от ошибок, вызванных сбоями. А дизайн задания гарантирует, что есть только один способ выполнить задачу – правильный путь (любой другой путь – явно неправильный).

Если одна и та же ЧО в задании происходит дважды, то необходимо установить разработанные решения для предотвращения ошибок и проверки ошибок. Цель проверки ошибок проста: их устранение. Метод использует небольшие устройства для обнаружения или предотвращения возникновения дефектов работы.

Когнитивные ЧФ в производственных системах. Когнитивные ЧФ рассматриваются [7] как признаки трудовой деятельности, требующей использования познания: *внимания (бдительности, избирательное и устойчивое внимания), рабочей памяти и исполнительной функции (инициативы, принятия решений, решения проблем)*. Цель исследования – содействие работе над *когнитивными ЧФ* путем повышения знаний и понимания взаимодействия *факторов* и их влияния на человека, работающего в

системе. Документ определяет *умственную усталость, однообразие, снижение бдительности и умственное насыщение* как термины, связанные с умственной нагрузкой.

Для обозначения *когнитивных ЧФ* используется также термин *когнитивной способности человека*.

Предложена модель из четырех секторов:

- 1) сектор когнитивной усталости,
- 2) сектор кривой обучения,
- 3) сектор усилия,
- 4) обрабатывающий сектор.

Когнитивное моделирование ЧО обсуждается в исследовании [8].

Методика анализа когнитивных ошибок для нефтяной и газовой промышленности. Основной причиной аварий в нефтегазовой промышленности является *человеческая ошибка* [9]. Отмечается, что в то время как для ряда отраслей проводился ее всесторонний анализ, в нефтяной и газовой промышленности такой анализ пока отсутствует.

Показано использование *метода ретроспективы и прогностического анализа когнитивных ошибок* (Technique for Retrospective and Predictive Analysis of Cognitive Errors - TRACEr) для рассмотрения произошедших аварий в нефтяной и газовой промышленности.

На примере 163 крупных и /или смертельных несчастных случая в нефтегазовой отрасли за период с 2000 по 2014 гг. показано, что преобладающим контекстом ошибок была внутренняя коммуникация, в основном, под влиянием факторов восприятия. Из крупных аварий отмечены крановые аварии и падение объектов, относящиеся к доминирующему типу аварий – «удар». А основными участниками этих событий являлись бурильщики и операторы. Подчеркивается, что в большинстве случаев, метод TRACEr оказался очень полезным в выявлении основных ошибок задачи.

Позднее для нефтегазовой отрасли были использованы *когнитивные ошибки* и предложен модифицированный вариант инструмента, названный *методикой ретроспективного и прогностического анализа когнитивных ошибок для нефтегазовой промышленности* (Technique for the Retrospective and Predictive Analysis of Cognitive Errors for the Oil and Gas Industry - TRACEr-OGI). Рассматривались следующие *когнитивные области: восприятие, память, оценка, планирование и принятие решений, выполнение действия, нарушение, саботаж*. Подчеркивается, что модифицированный аналитический инструмент оказался более эффективным для анализа аварий в нефтегазовой отрасли.

Человеческие факторы и методы эргономики на практике. Человеческий фактор и эргономика должны гарантировать, что их методы доступны, применимы и используются на практике [10]. Обращается внимание на то, что большинство методов, как правило, разрабатываются исследователями академических учреждений и публикуются в научных журналах, книгах и материалах конференций. С другой стороны, предполагаемые пользователи методов HF/E (Human factors and ergonomics) часто являются специалистами-практиками, работающими в консалтинговых компаниях, производителях, изготовителях, поставщиках услуг и т.д. Отмечается, что со временем все более усугубляется разрыв между исследованиями и практикой, в результате чего возникает ряд проблем (в том числе, использование старых методов и низкий уровень освоения новых методов). Изложены *три ключевых ограничения* (из собственного опыта авторов как практиков, исследователей, пользователей инструментов и разработчиков), которые влияют на применение методов HF/E на практике.

Первое ограничение на использование методов HF/E на практике связано с *доступностью журнальных статей*. Это ограничение относится к тому, насколько легко получить доступ к методам, а также к *удобству использования* (оно включается в качестве специального и фундаментального ограничения). Многие методы, особенно те, которые разработаны в исследовательских средах, освещаются только в научных журналах.

Второй вопрос касается *доступности программного обеспечения*. Многие методы могут использоваться на общих программных платформах и приложениях. В то же время, отдельные методы требуют программного обеспечения, которое:

- используется редко или не включено в стандартные конфигурации компьютеров в организациях,
- является собственностью,
- не функционирует с обновлениями операционных систем,
- требует значительных инвестиций в обучение.

Третий вопрос доступности касается совместного использования интеллектуальной собственности. Некоторые организации считают необходимым защищать права интеллектуальной собственности. Такая защита может иметь свои недостатки. Клиенты и практики (а иногда и те, кто использует такую ограничительную маркировку) часто не понимают должным образом правовые вопросы.

Эргономика и управление безопасностью. Эргономика и знания о человеческих факторах могут играть важную роль и, следовательно, должны быть включены или являться частью *управления безопасностью* – междисциплинарной области, связанной с пониманием фактических рабочих ситуаций и потенциальных изменений [11]. Такой

многодисциплинарный подход в конечном счете обеспечит безопасность, здоровье и благополучие всех сотрудников. Обсуждаемые вопросы касались *промышленной когнитивной эргономики* и инженерной психологии, *человеческого фактора, человеческой ошибки, оценок надежности, устойчивости* и производительности.

О необходимости акцентировать внимание на ЧФ – *организационную и когнитивную эргономику* – указывается и в работе [12]. Подчеркивается, что в последнее время эта тема все более актуальна при расследовании нефтяных аварий.

Обсуждается вопрос о том, в какой степени органы нефтяной промышленности и безопасности в Норвегии сосредотачивают внимание на *организационной, когнитивной и физической эргономике*, начиная с этапа проектирования. Для изучения этого проведено инновационное исследование развития четырех центров управления в норвежской нефтегазовой промышленности (в сотрудничестве с пользователями, менеджментом и экспертами по ЧФ). Полученные результаты показали отсутствие опыта в области *организационной и когнитивной эргономики* у компаний и органов безопасности, а также недостаточную приоритетность этой области. Отмечается, что часто в фокусе исследований находится лишь легко наблюдаемая часть ЧФ (*физическая эргономика*).

Подчеркивается, что недостаточное внимание к ЧФ в процессе проектирования создает сложные условия для людей-операторов и влияет на безопасность и устойчивость процесса. Отсутствуют такие *навыки*, как *коммуникация и принятие решений*, а новое техническое оборудование (замкнутое телевидение) внедряется без надлежащего использования стандартов ЧФ. Обращается внимание на то, что в ответственных организациях необходимо как можно раньше привлекать специалистов по ЧФ. Проверка и подтверждение ЧФ должны быть улучшены и выполняться с самого начала сертифицированными экспертами по ЧФ (в сотрудничестве с работниками). А органы власти должны обеспечивать проверку того, что нормативная база по ЧФ передается, понимается и соблюдается.

Факторы формирования производительности, используемые при анализе надежности человека. Как отмечается в исследованиях [13], многие *антропогенные* аварии указывают на важность *анализа надежности человека* (Human Reliability Analysis - HRA) в снижении и устранении ошибок человека, и тем самым, повышении надежности систем «человек–машина». Метод HRA использует как качественный, так и количественный подходы для определения ошибок операторов и контекстов, в которых выполняются задачи.

Для того чтобы результаты HRA могли объективно оценивать ошибки человека, количественная оценка *вероятности ошибок человека* (Human Error Probability - HEP)

основывается на *качественном анализе человеческих факторов* и контекстов задач и дополнительно уточняется *факторами формирования производительности* (Performance Shaping Factors - PSFs).

Развитие процесса НЕР включает в себя выбор PSFs, оценку PSFs и стратегию количественной оценки НЕР. В современных исследованиях HRA отмечается разнообразие количественных оценок на основе PSFs. В данной работе рассматриваются три основные стратегии количественной оценки, используемые в методах HRA. Кроме того, авторы обобщают модификацию НЕР с PSFs.

Существование общего *фактора надежности* (Reliability Factor) человека, который часто упускается из виду или игнорируется при использовании функций безопасной автоматизации (Safety Instrumented Functions - SIFs), отмечается в исследовании [14, 15].

О взаимосвязи *человеческих факторов* (Human factors - HF) и надежности человека указано в работе [15].

Анализ ЧФ и анализ *надежности человека* HRA часто рассматриваются как две различные дисциплины. Первая обсуждается в рамках экспериментальной психологии, а вторая связана с инженерным подходом к оценке риска. Но между этими подходами существует значительное совпадение и как утверждается [16, 17] на самом деле они более интегрированы, чем отличны друг от друга.

Высокий уровень возникновения *человеческих ошибок* (Human Errors - HEs) повысил внимание исследователей к анализу надежности человека HRA и подходам к оценке HE. В этих подходах учитываются различные экологические и индивидуальные факторы, оказывающие влияние на работу операторов технического обслуживания, которая, в свою очередь, влияет на вероятность *человеческой ошибки* НЕР. Однако, глубокий анализ таких факторов, называемых *факторами формирования производительности* (PSFs), в области технического обслуживания по-прежнему отсутствует.

Проведен систематический обзор литературы для выявления и отбора рецензируемых документов, указывающих на взаимосвязи между деятельностью по техническому обслуживанию и деятельностью человека. Определены и детализированы эффекты от каждого PSF на надежность человека. Было отобрано 63 исследования, в 46% этих исследований содержалась качественная/количественная оценка PSFs. На основе документов предложена таксономия PSF, специфичная для деятельности по техническому обслуживанию и представляющая собой важный вклад для исследователей и практиков в совершенствование методов HRA и их применение при промышленном обслуживании.

Методы анализа надежности человека. В сложных промышленных системах причиной или фактором, способствующим авариям и катастрофам, названа ошибка человека. Применение *метода оценки и сокращения ошибок человека* (Human Error Assessment and Reduction Technique - HEART) для оценки надежности человека обсуждается в работе [18].

Модификация *метода оценки надежности человека* на основе метода CREAM-BN (по материалам исследования в управлении нефтехимического завода) представлена в работе [19].

Нечеткий анализ надежности человека и его приложения обсуждаются в исследовании [20].

Представлены преимущества использования *нечеткой математики* для количественной оценки *надежности человека*. Отмечается увеличение области применения *нечетких методов* для анализов надежности человека.

При улучшении анализа надежности человека нечеткие вклады отмечаются по пяти основным аспектам:

- 1) обработка неопределенности,
- 2) обработка данных экспертного суждения,
- 3) построение нечетких деревьев неисправностей,
- 4) оценка факторов, влияющих на производительность,
- 5) построение модели поведения человека.

Переоценены приложения и вклад *теории нечетких множеств* в анализ *надежности человека* (HRA).

Отмечается, что одни авторы HRA внесли вклад в разработку новых моделей, вводящих *нечеткие методологии* количественной оценки, а другие авторы использовали *нечеткие методы* или *методологии* для количественной оценки уже существующих моделей.

Проблемы с данными. Проблемы с данными для анализа надежности человека обсуждаются в работе [21]. Отмечается, что отсутствие эмпирических данных часто является серьезной проблемой при анализе надежности человека (Human reliability analysis - HRA).

Дело в том, что методы HRA были разработаны не как объективные *количественные* методы тестирования, а скорее, как *качественные* методы оценки (поскольку объективных данных не существует). Но из-за того, что методы HRA включают существенную *качественную* оценку характеристик элементов (факторов

изменения формы элементов, а также их *прочности*), то эти элементы не могут быть объективно измерены.

Обсуждаются также и другие проблемы, связанные со сбором данных из отчетов о событиях, обзоров литературы, экспериментов и баз данных.

В итоге сделан вывод о необходимости принятия решения о том, как следует смотреть на методы HRA – как на *качественные* методы оценки или как на *объективные количественные* методы исследований. Подчеркивается, что *количественные* и *качественные* методы имеют различные подходы к оценке качества методов, что и затрудняет для них быть чем-то средним.

Оценка надежности человека. *Антропогенные* (связанные с деятельностью человека) аварии указывают на важность HRA в снижении и устранении ошибок человека, и тем самым, повышении надежности систем «человек–машина». Метод HRA использует как *качественный*, так и *количественный* подходы для определения ошибок операторов и контекстов, в которых выполняются задачи.

Для обеспечения того, чтобы результаты HRA могли объективно оценивать ошибки человека, *количественная оценка вероятности ошибок человека* (Human Error Probability - HEP) обычно основывается на *качественном анализе человеческих факторов* и контекстов задач и дополнительно уточняется *факторами формирования производительности* (Performance Shaping Factors - PSFs) [13].

Развитие HEP включает в себя выбор PSFs, оценку PSFs и стратегию количественной оценки HEP. В современных исследованиях HRA отмечается разнообразие *количественных* оценок на основе PSFs. В данной работе рассматриваются три основные стратегии *количественной* оценки, используемые в методах HRA. Кроме того, авторы обобщают модификацию HEP с PSFs.

Анализ надежности человека (HRA) выявляет и анализирует причины, последствия и вклад деятельности человека (включая сбои) в сложных социотехнических системах. Как правило, исследование HRA концентрируется на моделировании производительности работников на переднем крае, оценивая тех, кто непосредственно участвует в управлении системой (особенно, операторов). Однако, теоретически анализ надежности может быть применен к любому виду человеческих действий, в том числе, дизайнеров и менеджеров.

В исследовании [22] обращается внимание на то, что *оценка надежности человека* имеет элементы противоречия (от определения терминов до применения соответствующих методов для представления вероятности неудачи человека – *ошибки*). К тому же, как отмечается, идея о том, что *человеческая ошибка* является случайным событием, выходит из моды, а концепция, что люди могут быть настроены на неудачу или

успех, в зависимости от контекста, все больше завоевывает доверие. Автор Anthony J. Spurgin был в авангарде развития HRA в течение последних 20 лет и способствовал разработке методов и инструментов надежности человека, которые применялись для повышения безопасности атомной электростанции и космических аппаратов. Он исследовал требования, предъявляемые к операторам реакторов для обеспечения их безопасности и анализировал роль управления предприятием в принятии решений как при проектировании, так и в ходе эксплуатации. Изучение современных теорий и практики оценки надежности человека показывает, как можно моделировать, изменять и применять новые подходы к ряду различных отраслей с высоким риском.

Анализ надежности человека с психологической точки зрения. В исследовании [23] предлагается новый подход к HRA путем внедрения *модели производственного стресса* в управление человеческими ресурсами. Обращается внимание на то, что большинство существующих методов HRA ограничены заданным набором *факторов риска* в задаче, которые часто называют *факторами, формирующими производительность*. Такие методы построены на причинно-следственной связи между PSFs и *производительностью человека*, без учета *психологических факторов*, управляющих поведением человека. Авторы утверждают, что хорошо разработанная *модель профессионального стресса* (которая включает в себя комплексные условия труда и фокусируется на психологических факторах) дает новую перспективу для оценки *надежности человека*.

Предлагаемый подход – метод «требования к задаче – ресурсы» (Task Demands-Resources - TD-R) – предполагает, что факторы PSFs в задаче можно разделить на две группы: *требования к задаче* и *ресурсы задачи*. Эти группы PSF могут как мотивировать, так и напрягать операторов во время выполнения задачи, тем самым влияя на их производительность.

На этой основе разработана *вероятностная модель*, связывающая *интенсивность мотивации* с *вероятностью человеческой ошибки* (HEP) при различных уровнях стресса. Для проверки эффективности и гибкости метода TD-R проводился эксперимент по надежности человека, результаты которого показали, что метод TD-R может:

- дать объяснение производительности (работоспособности) операторов,
- обеспечить результат количественной оценки HEP.

Прогнозирование надежности человека. Исследование количественных методов оценки и прогнозирования надежности человека, а также применение оценки надежности (Nuclear Action Reliability Assessment - NARA) к интерактивным системам «человек-робот» описаны в работе [24]. Дается обзор некоторых последних методов HRA,

наиболее часто используемых в системах с участием человека. Цель работы – понимание роли надежности человека в *системах взаимодействия человека и робота*.

Надежность человека – важный фактор в определении и оценке системы. Анализ HRA учитывает факторы, которые часто приводят к некорректным, небезопасным действиям и катастрофам.

Подробно рассмотрены *три генерации HRA*. Статья направлена на расширение технологии HRA третьего поколения, называемой Nuclear Action Reliability Assessment (NARA - Оценка надежности ядерных (атомных) действий), к системам Human Robot Interactive (HRI – взаимодействию человека и робота).

Рассмотрены примеры приложения NARA к системам HRI с расчетом НЕР. Отмечается, что такой анализ дает способ характеризовать ЧФ в контексте сред HRI, которые потенциально могут заменить большую часть имеющихся систем на основе человека.

NASA (National Aeronautics and Space Administration) Johnson Space Center (JSC Safety) – Национальное управление по авионавтике и исследованию космического пространства США), космический центр имени Джонсона (ОАО) и миссия по обеспечению безопасности (Mission Assurance - S&MA) – используют две *методики анализа надежности человека (HRA)*.

Первая методика – упрощенный метод, основанный на том, сколько времени имеется для завершения действия, с учетом экологических и личных факторов, которые могут повлиять на *надежность человека*. Этот метод обеспечивает *консервативное* значение (предварительную оценку).

Вторая методология используется для разработки более детальной оценки *надежности человека* при выполнении человеком критических действий. Она должна учитывать не только имеющееся в наличии время, но и ряд дополнительных факторов: важность действий, влияние окружающей среды, потенциальные и внутренние стрессы человека, профессиональную подготовку.

Ожидается, что эта оценка будет более реалистичной, чем оценка, основанная, главным образом, на имеющемся в распоряжении времени.

При выполнении HRA для системы или процесса с *историей эксплуатации* должна быть учтена специфическая информация, связанная с этой историей и опытом.

В случае *вероятностной оценки риска* (Probabilistic Risk Assessment - PRA), которая основана на новой конструкции (проекте, замысле), не имеющей истории эксплуатации, задача обеспечения оценки потенциальных действий команды становится более сложной.

Для определения того, что ожидается от новых эксплуатационных параметров и получения наилучших данных, использовался опыт лиц, знакомых с системой и процессом, ранее внедренными НАСА.

Антропоцентрический подход в современном интеллектуальном производстве. Другой важный вопрос, касающийся устойчивого производства – *старение*. Одна из тенденций в *умном производстве* заключается в том, чтобы как можно меньше операторов было занято в производственных цехах. Однако, квалифицированные и опытные рабочие всегда необходимы для того, чтобы управлять и поддерживать рост сложности умной системы.

По оценкам, к 2025 г. доля работающих лиц в возрасте старше 50 лет составит 32% в Европе, 30% в Северной Америке, 21% в Азии и 17% в Латинской Америке. В 2050 г. около половины работников в развитых странах будут старше 50 лет. Из-за уменьшения физических и *когнитивных* способностей стареющих работников (включая снижение зрительных и акустических способностей, а также опорно-двигательного аппарата и двигательных способностей) устойчивость к рабочей нагрузке значительно уменьшится. Поэтому производственная структура должна быть адаптивной для решения *проблемы старения*.

Знания и опыт старших экспертов необходимы для улучшения процесса обучения новых.

Когнитивные модели для анализа надежности человека. Обзор *когнитивных моделей* в анализе надежности человека дан в исследовании [25]. Подчеркивается, что ошибочное поведение человека определяется как *экологическими*, так и *человеческими факторами*. В частности, *психологические* и *духовные факторы* оказывают решающее влияние на *человеческие ошибки*.

Когнитивная модель человека не только дает четкое представление о процессе генерации и механизме ошибочных действий человека, но и повышает точность и достоверность HRA, что помогает избежать и предотвратить ЧО в промышленных областях.

Подчеркивается важная роль, которую *когнитивная модель* сыграла в HRA. На основе анализа природы человеческого поведения и классификаций распространенных ЧО были объединены несколько типичных *когнитивных моделей* в областях эргономики, поведенческой науки и *когнитивной инженерии* (включая *когнитивную модель*, связанную с процессом; модели обработки информации и процесса принятия решений, а также *когнитивную имитационную модель*, основанную на компьютерных технологиях).

Рассматриваются *когнитивные* модели и соответствующие им методы HRA, применяемые в надежности, технике безопасности и оценке рисков.

Предлагаются некоторые направления и задачи для будущего исследования *когнитивных* моделей, применяемых в методах HRA.

Разработке *когнитивной модели* для анализа надежности человека посвящено исследование [26]. Оценка надежности взаимодействия систем «человек-машина» является важным фактором, влияющим на общую производительность и безопасность на промышленных предприятиях. Однако, несмотря на то, что методы HRA были доступны в течение десятилетий, не существует универсального метода/процедуры для уменьшения ЧО, влияющих на производительность человека. Цель данной работы – предложение нового подхода к исследованию взаимосвязи между *надежностью человека* и *производительностью оператора*, с учетом зависимости от времени для принятия решений.

Первый шаг (предварительный анализ) направлен на определение действий, выполняемых операторами. При каждой операции назначается *вероятность человеческой ошибки*.

В работе [10] предлагается для каждой задачи о *ненадежности человека* набор значений, определенных как 5-й процентиль (для первого часа работы) и 95-й процентиль (для восьмого часа работы).

Надежность максимальна в первый час работы ($t = 1$) и минимальна в восьмой час работы ($t = 8$), как определено в уравнении

$$k = 1 - \text{HEP}_{nom}(t), t \in [1; 8],$$

где

k – параметр, представляющий значение надежности оператора.

После определения общей оценки задач (Generic tasks assessment - GTTs) рассчитывалась вероятность ошибки, связанная с каждой GTTs, в соответствии с распределением вероятности Вейбулла, которое наилучшим образом описывает вероятность ошибки.

А именно, вероятность ошибки описывается индексом (Human Error Probability – HEP), определяемым в соответствии с распределением Вейбулла:

$$\text{HEP}_{nom} = 1 - e^{-at^\beta},$$

где

параметры α, β представляют соответственно масштаб и форму кривых.

Рассматриваются:

- минимизация влияния ЧФ и сокращение числа крупных аварий,
- когнитивная надежность и метод анализа ошибок (CREAM).

В исследовании [4] представлена формула, отображающая *среднее время реакции человека с учетом влияющих факторов*:

$$T(1/2) = T^*(1/2)(1 + K_1)(1 + K_2)(1 + K_3)$$

В ней используются коэффициенты PSF (performance shaping factors – PSFs – *факторы формирования производительности*):

K1 – опыт оператора,

K2 – уровень стресса,

K3 – качество интерфейса оператора/предприятия.

Исследование [27] оценивает способ проведения HRA в *процессе проектирования*, поскольку предыдущие исследования показали, что отказ конструкции является преобладающим фактором ошибок человека. Учитываются действия человека и внешних факторов на протяжении всего жизненного цикла проекта.

Цифровое моделирование человека. Оценка *эргономически уязвимых мест* на стадии проектирования описана в работе [28]. Подчеркивается, что *ЧО* и *плохая эргономика* – основные факторы крупномасштабных аварий и сбоев в сложных инженерных системах, а также главные причины травм работников. Часто конструкторские недостатки распространяются на *ошибки взаимодействия человека и машины*, где люди-операторы обвиняются или травмируются. Поэтому выявление потенциальных *ЧО* и *эргономических проблем* может помочь дизайнерам уменьшить риск таких уязвимостей системы и снизить их стоимость.

В рамках метода HEFFR (Human Error and Functional Failure Reasoning – *человеческая ошибка и функциональная несостоятельность*) можно определить потенциальные *ЧО*, функциональные сбои и пути их распространения. Однако, метод HEFFR не позволяет оценивать экономические уязвимости.

Исследование надежности человека на производстве. Конкретный пример оценки надежности человека в *производственном процессе* дан в работе [29].

Рассмотрены:

- оценка вероятности ошибки человека (Human Error - HE),

- приложение метода HEART (Human Error Assessment Reduction Technique) для получения окончательной оценки вероятности ЧО.

HEART – это метод экспертного суждения, который опирается на знания и опыт оценщика в отношении оцениваемых действий).

Приложение метода SPAR-H для оценки вероятности ЧО. Цель метода – определение *вероятности ошибки человека* на основе влияния *фактора производительности*. Важно, что для оценки *вероятности человеческой ошибки* с помощью метода SPAR-H необходимо мнение специалиста (влияние *ЧФ* основывается на задании составного фактора – коэффициента, который определяет работоспособность).

Химическое и нефтехимическое производство. В статье [30] обсуждается интеллектуальное производство, основу которого составляют единицы высокого риска. В качестве примера рассматривается *крупномасштабное нефтехимическое оборудование*. Наиболее важный фактор обеспечения безопасности такого оборудования – *надежность человека*. Для соответствующей модели «человек–работа» применяется *целочисленное программирование*, которое позволяет минимизировать фактор *безопасности человека* и *величину заработной платы*, а также удовлетворить требованиям производственного заказа и качества оператора.

При решении задачи используется *усовершенствованный генетический алгоритм*. Результаты расчета по предложенной модели (при исследовании крупной металлургической компании) показали ее эффективность. Новая интегрированная модель обеспечивает более реалистичные соответствия для соотношения «человек-работа».

Описаны имеющиеся исследования *надежности человека* и моделирование соответствия на основе компетентности и сложности, указаны его сильные и слабые стороны.

Ограничение исследования: принцип соответствия «человек-работа» требует дальнейшего эмпирического анализа с использованием *больших выборочных данных* по нескольким предприятиям.

В будущих исследованиях предполагается:

- многостороннее сотрудничество основных операторов оборудования и многотипная совместная работа,
- рассмотрение способов определения показателей психологии и поведения, а также надежности ЧФ.

В работе [31] приводится таблица для *факторов формирования производительности* (Performance Shaping Factors (PSF)) в стандартизированном *анализе*

риска на производстве - *анализе надежности человека* (Standardized Plant Analysis Risk - Human Reliability Analysis).

Указаны 5 видов PSF, для каждого из которых дано описание, приведены уровни диагностики, уровни действия (Action levels), коэффициенты (множители -Multipliers).

Атомная промышленность. Исследования по применению методов *анализа надежности человека* на ядерных промышленных объектах и их эволюция на протяжении многих лет рассматриваются в работе [32].

Анализ надежности человека (HRA) является одним из элементов, используемых в *вероятностном анализе безопасности* (Probabilistic Safety Analysis - PSA) и выполняется как часть PSA.

Большое внимание уделяется применимости методов HRA на протяжении многих лет в атомной промышленности (особенно, на атомных электростанциях - Nuclear Power Plants - NPP).

Проведен электронный поиск на портале CAPES журналов (библиографическая база данных). В общей сложности в результате первоначального поиска извлечены 94 работы, а 13 из них выбраны для рассмотрения и обсуждения применения имеющихся методов в атомной промышленности.

Результаты указывают на то, что *методы первого поколения* в большей степени используются на практике, чем *методы второго поколения*. Это происходит потому, что они более сосредоточены на *количественной* оценке (с точки зрения успеха или неудачи человеческой деятельности), что делает их полезными при *количественной оценке риска* для PSA.

Отмечается, что хотя *методы второго поколения* учитывают контекст и некоторые недочеты в человеческом прогнозе ошибки, они недостаточно широко использовались на практике для PSA в атомной промышленности.

Электроэнергетика. В работе [33] показано практическое применение *метода оценки и сокращения ошибок человека* (Human Error Assessment and Reduction Technique - HEART) для HRA в электроэнергетической компании Сербии (Electric Power Company of Serbia - EPCS).

Полезность этого метода для HRA была одобрена при исследовании аварии, случившейся при ремонте стальной решетчатой башни в Сербии. Использовалась база данных о травмах, связанных с работой, несчастных случаях и критических вмешательствах в течение 10 лет.

Исследование включало анализ 1074 рабочих мест (3997 сотрудников). Оно подтвердило, что метод HEART основан на знаниях о человеческой деятельности и

полагается на *экспертное заключение* для определения *условия появления ошибки* (Error Producing Condition - EPCs), повлиявшей на ситуацию.

Подчеркивается, что HEART возможно использовать в различных промышленных системах:

- при оценке риска (как инструмент для расследования и прогнозирования аварий),
- для относительно быстрой оценки вероятности ошибки (поскольку он легко понимается и применяется).

Анализ надежности человека на протяжении всего жизненного цикла проекта.

В работе [27] проводится *анализ надежности человека* (Human reliability analysis – HRA) с учетом его действий и внешних факторов на протяжении *всего жизненного цикла проекта*. Он позволяет выявить причины и последствия деятельности человека (включая сбои) в сложных социотехнических системах.

Обычно исследование HRA концентрируется на моделировании производительности работников на переднем крае и оценке тех, кто непосредственно участвует в управлении системой, особенно операторов. Однако, теоретически анализ надежности может быть применен к любому виду человеческих действий. Важно то, что данная работа оценивает способ проведения HRA в процессе *проектирования*, (поскольку предыдущие исследования показали, что отказ конструкции является преобладающим фактором ошибок человека).

Для моделирования сложных отношений в рамках *когнитивных* функций, организационных и технологических факторов предлагается *Байесовская сеть (BN)*, которая позволяет как детерминированное или вероятностное изучение опыта, так и включение новых данных.

Таблицы *условных вероятностей* могут быть получены (из имеющегося набора данных крупных промышленных аварий в различных отраслях) с помощью классификационной схемы (разработанной Hollnagel (1998) – ссылка дана в [37]) для метода HRA под названием CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) - *метода когнитивной надежности и анализа ошибок*.

Эта модель позволяет установить, какие факторы больше всего влияют на производительность человека в различных сценариях. Обсуждается также возможность применения данной модели к каким-либо действиям человека в течение всего жизненного цикла проекта (с момента проектирования, включая его управление и контроль).

Отношения между *факторами формирования производительности* (the performance shaping factors - PSFs), когнитивными функциями и ошибочными действиями человека описаны и смоделированы в БС. При этом используется важное преимущество БС – возможность моделировать сложные взаимосвязи между переменными различной природы.

Анализ надежности человека (HRA) включает:

- 1) *графическое представление* уравнений для условных вероятностей. Следует отметить, что визуальное представление БС (практический способ указания связей между факторами) способствует установлению связей и внутри многодисциплинарной группы, которая при анализе HRA должна вовлекать инженеров, психологов и социологов,
- 2) *вероятностное представление неопределенности*, позволяющее совмещать его с вероятностной оценкой безопасности,
- 3) *сочетание различных источников информации: эмпирических источников* как базы данных о событиях; *теоретических моделей* человеческого знания и *экспертного суждения*.

В итоге построена Байесовская модель для *надежности человека*, описаны ее узлы и их состояния, получены *таблицы условных вероятностей* (из набора данных о крупных авариях в различных отраслях промышленности). Для того чтобы сделать вывод о факторах, более всего влияющих на производительность человека, использовались результаты верификации.

Авторами рекомендуется продолжение исследований и учет в будущих моделях всех факторов, предложенных по схеме классификации CREAM's (Cognitive Reliability and Error Analysis Method - Hollnagel, 1998). Обращается внимание на то, что учет таких факторов, как «*чрезмерный спрос*» и «*когнитивный стиль*» (excessive demand' and 'cognitive style') может дать улучшенную модель для менеджеров. С этой целью должны быть проверены программное обеспечение и алгоритмы расчета, чтобы обеспечить больше связей между узлами (а в будущем предполагается тестирование как программного обеспечения для количественной оценки неопределенности, так и инструментария БС).

Сравнение методов анализа надежности человека. Как отмечается в исследовании [26], *анализ надежности человека* является важным инструментом оценки *человеческих факторов*, влияющих на поведение человека в случае стихийных бедствий.

При сравнении различных *методов анализа надежности человека* [36] рассматриваются:

- анализ надежности человека и анализ задач,
- идентификация ошибки человека (ЧО) (факторы формирования работоспособности, классификация ошибок),
- количественная оценка ЧО (анализ дерева ошибок; методы оценки надежности человека),
- методика прогнозирования частоты ЧО (Technique For Human Error Rate Prediction (THERP)),
- стандартизованная оценка анализа риска надежности человека на предприятии (Standardized Plant Analysis Risk Human Reliability Assessment (SPAR-H)),
- когнитивная надежность и метод анализа ошибок (Cognitive Reliability And Error Analysis Method – CREAM),
- метод экспертной оценки.

Сравнение *методов анализа надежности человека* проводилось также в работе [46]. Обсуждались три известных метода - THERP, SPAR-H, CREAM, используемые для *количественной* оценки. Сделан вывод о том, что *вероятности ошибок человека*, полученные от *экспертного* сообщества, являются более реалистичными результатами.

Сравнение показано, что:

- результаты методов SPAR-H and CREAM имели минимальную разницу,
- метод CREAM наиболее подходит при выполнении поставленной задачи для оператора на Volkerak – комплексе,
- общая вероятность ЧО, которая может привести к задержке из-за оператора равна 0,0196.

В целом, большинство методов HRA используют три этапа [46].

1. *Анализ задачи*. Общая задача разбивается на более мелкие действия для дальнейшего анализа.

2. *Идентификация ЧО*. Определяются факторы формирования производительности, количество факторов может изменяться от 1 до 50.

3. *Количественная оценка ЧО*. Эта оценка показывает вероятность того, что в конкретной задаче произойдет ЧО. На этом этапе вычисляется НЕР.

Подчеркивается, что стандарта для расчета нет. Он может быть основан на PSF, экспертной оценке, моделировании или байесовском подходе.

При HRA используются как *количественные*, так и *качественные* методы.

Качественные методы применяются в определении анализа задачи, в котором задача подразделяется на более мелкие действия. Кроме того, частью качественного метода является идентификация PSF.

Количественная часть HRA – расчет НЕР (вычисление вероятности возникновения ЧО для конкретной задачи путем деления числа ошибок на число выполненных заданий).

Методы HRA, используемые в настоящее время, подразделяются на четыре категории.

Первые методы HRA интегрировали количественный анализ рисков, человеческие поступки и ошибки. Однако, они не учитывали *когнитивный аспект*, ошибку комиссии, контекст и организационные факторы при рассмотрении PSF.

Методы HRA *1-го поколения*, используемые в данном исследовании: методика *прогнозирования частоты ошибок человека* (THERP) и стандартизированный анализ производства; оценка надежности и риска человека (Standardized Plant Analysis Risk - Human Reliability - SPAR-H).

2-е поколение. В этом поколении в прогнозировании ЧО рассматриваются: ошибка комиссии, контекст и *когнитивные* процессы. Эти методы более сложные, поскольку в большей степени фокусируются на *когнитивном* аспекте надежности человека, в то время как *первое поколение* HRA фокусируется только на *поведенческом* аспекте надежности человека. Во 2-м поколении больше *психологии*. 2-е поколение метода HRA, используемое для данного исследования – это когнитивная надежность и метод анализа ошибок (Cognitive Reliability and Error Analysis Method - CREAM).

3-е поколение – представляет собой сочетание *первого* и *второго поколения* HRA. Например, метод оценки и уменьшения человеческой ошибки (метод первого поколения) пересмотрен и теперь является методом 3-го поколения под названием NARA (Nuclear Action Reliability Assessment).

Методы экспертного суждения. В случае, когда нет данных или методов для использования, хорошим методом является *метод экспертного суждения*. Поскольку информация основана на данных экспертов с мест, это даст понимание, которое исследователь мог и не получить (однако, не исключается и предвзятость эксперта). Кроме того, для экспертного суждения требуется много времени (эксперты оценивают, насколько вероятна возможность ошибки).

Этот метод подходит также, когда другие методы HRA не пригодны для определенных отраслей промышленности. Примером является метод номинальной группы (NGT), в котором эксперты обсуждают свои оценки по теме, а затем рассчитывается среднее значение баллов.

Производственный риск, вызванный человеческими факторами. Исследование *производственного риска*, вызванного ЧФ на тепловых электростанциях в течение всего производственного процесса, проведено в работе [34]. Сделан акцент на существенных

ЧФ, потенциально влияющих на производственные риски тепловых электростанций: *отношение к работе, осознание безопасности, творческий подход и осознании необходимости охраны окружающей среды.*

Проведен анализ, связывающий ЧФ с различными видами *производственного риска*, предложены соответствующие методы управления для учета этих ЧФ и практические подходы к управлению человеческими ресурсами при управлении производством на тепловых электростанциях. Определены девять ЧФ, влияющих на производственные процессы на тепловых электростанциях: эффективность выполнения заказов, креативность, текучесть кадров, профессиональные навыки, осознание безопасности, нарушение процедур эксплуатации, психологические факторы и гигиена, экологическая осведомленность и отношение к работе. Подробно проанализированы различные элементы основных ЧФ. В отдельной таблице показаны ЧФ и соответствующие методы управления ими (среди ЧФ, обобщенных в этой таблице, наиболее влиятельным является отношение к работе). В табличной форме представлены также выявленные ЧФ и влияющие на них процедуры.

Выделены и производственные риски, обусловленные ЧФ на тепловых электростанциях: риски при выборе сырья, закупке оборудования, техническом обслуживании оборудования, обработке нестандартных ситуаций, человеко-машинном взаимодействии, мониторинге диспетчерского пункта, наземном обследовании, техническом совершенствовании, ручном управлении и принятии решений по охране окружающей среды. Среди всех выявленных рисков риск при нестандартной ситуации определяется как наиболее серьезный (как только нестандартная ситуация не может быть должным образом урегулирована, цепная реакция может значительно ухудшить ситуацию). Отмечается, что это – одно из первых исследований, изучающих влияние ЧФ на риск при принятии решений по охране окружающей среды, ручном управлении, техническом совершенствовании, выборе сырья, покупке оборудования и наземной инспекции.

Методы анализа риска и интеграции ЧФ в оценку риска. Уроки, извлеченные из аварий, ошибки человека, превентивное проектирование и снижение риска обсуждаются в работе [36].

Один из подходов *интеграции ЧФ в стандартную оценку риска* предлагается в исследовании [35]. Цель данной работы – обеспечение альтернативного подхода в комплексной деятельности сервисной компании по идентификации и оценке рисков. Отмечается, что оценка ЧФ в нефтегазовой отрасли по-прежнему находится на стадии развития, в сравнении с другими отраслями, где большинство публикаций по ЧФ

ориентированы на их применение на стадии проектирования. Важно, что методы ЧФ могут применяться на любом этапе, способствуя преодолению разрыва между понятиями «воображаемая работа» и «выполненная работа».

Используемый обычно инструмент – *оценка надежности человека* (HRA) включает в себя ЧФ в процессе *оценки риска*, однако этот метод занимает много времени и принимается не без значительных усилий, затрачиваемых на обучение и эксплуатацию.

Авторами предложен *упрощенный метод*, ориентированный на ключевые факторы из методики оценки и снижения ошибок человека (Human Error Assessment & Reduction Technique - HEART), соответствующие характеру деятельности сервисной компании. Он интегрирован в существующую *качественную оценку риска* для пересчета общего риска в конкретной задаче. Процесс и модель *оценки риска* модифицируются для включения разделов, посвященных ЧФ.

Модифицированный подход к *оценке риска* изменит стандартную практику *оценки риска*, переместив фокус на присущую задаче ненадежность из-за возникновения *ошибок*, которые вызваны неизбежными человеческими взаимодействиями в сложных системах. Этот метод будет включать *матрицу* для измерения *понимания операторами потенциально существующего риска* с помощью специального вопросника. Такая матрица измеряет улучшения (усовершенствования) в общем понимании риска, связанного с перспективными сотрудниками. Ожидаемые выгоды включают также дальнейшее улучшение подготовки и компетентности в области *оценки рисков* в компании. Введение *ключевых факторов производительности человека* в *оценку риска* поможет повысить осведомленность о ЧФ и их связи с *вероятностью существующего риска*.

О возрастании рисков при оценке рисков. Вопросы возникновения *искусственного интеллекта (ИИ)* и *недетерминированности* в критически важных для безопасности системах обсуждаются в работе [37]. Подчеркивается, что *оценка рисков* играет ключевую роль в системах управления безопасностью. Стандарты (IEC61508 и серия DO-178) расширили концепции для поддержки разработки программного обеспечения, связанного с системами.

Анализ надежности человека позволил разработать методы *оценки риска* для представления и обоснования *ошибки оператора* и *сбоя управления*. Однако, новые вызовы ставят под сомнение полезность традиционных подходов к разработке критически важных для безопасности систем.

Внедрение ИИ в рамках автономных систем затрудняет рассуждения о вероятности и последствиях неблагоприятных событий, когда управляющие приложения должны

использовать *предыдущие обучающие выборки*, чтобы направлять их реакцию на новые ситуации. Этот документ пытается сохранить основы *оценки рисков* в качестве инструмента техники безопасности перед лицом новых вызовов для разработки критически важных для безопасности приложений.

В Приложении А на примере авиационной инфраструктуры показана роль ЧФ в авариях. Анализ сформированной базы статистических данных по произошедшим авиакатастрофам показал, что наиболее частой причиной авиакатастроф являются ошибки экипажа и/или диспетчера (41%). А если учесть роль ЧФ при некачественном техническом обслуживании (6%), возможность террористического акта или иного вмешательства (6%), то участие человека в катастрофе составляет более 50%.

Выводы

1. Рассмотрены методы количественной оценки ЧО и ЧФ. Дан анализ ЧФ при создании интерфейса «человек-система» для системы поддержки управления тяжелыми авариями.

2. Особый акцент сделан на *когнитивных ошибках* и *человеческих факторах* на производстве. Описана методика анализа *когнитивных ошибок* для нефтяной и газовой промышленности.

3. Обсуждается *промышленная когнитивная эргономика*, показано применение ЧФ и *эргономики* на практике. Сделан важный вывод о необходимости включения *эргономики* как части в *управление безопасностью*.

4. Отмечается важность *анализа надежности человека* в снижении и устранении ЧО.

5. Количественная оценка *вероятности ошибок человека* должна основываться на *качественном* анализе ЧФ и контекстов задач и дополнительно уточняться *факторами формирования производительности*.

6. Обсуждаются различные методы *анализа надежности человека* и проблемы с данными для них, а также вопросы *прогнозирования надежности человека*. Проведено сравнение *методов анализа надежности человека*.

7. Приведены примеры *оценки надежности человека* на различных производствах (химическом, нефтехимическом, атомном и в электроэнергетике). Дан анализ *надежности человека* на протяжении всего жизненного цикла проекта.

8. Рассмотрены *когнитивные модели* и *когнитивная надежность человека*. Предлагается системный подход к исследованию *цифрового моделирования человека* для выполнения *эргономического* анализа на этапе концептуального проектирования.

9. Обсуждается *производственный риск*, вызванный ЧФ, методы его анализа и интеграции ЧФ в *оценку риска*, а также *управление ЧФ* для снижения *организационного риска* в промышленности.

10. На примере авиационной инфраструктуры показана роль ЧФ в авариях. Выбор определился возможностью провести поисковую работу по произошедшим авиакатастрофам и на реальном материале сформировать и статистически обработать результаты. Для других критичных инфраструктур имеющейся в открытом доступе информации не достаточно.

1.3.2 Методика оценки человеческого фактора в критичных инфраструктурах

В стандарте ГОСТ Р МЭК 62508-2014 [38] впервые приведено руководство по надежности систем в части, касающейся действий человека. Стандарт применим к любой области промышленности, где имеется взаимодействие «человек – машина», и предназначен для использования техническим персоналом и руководителями организации. В нем рассматривается обеспечение надежности, связанной с ЧФ, направленное на методы человеко-ориентированного проектирования и повышения надежности, которые могут быть использованы на всех этапах жизненного цикла системы. Документ позволяет учитывать влияние человека на надежность системы, включая применение эргономических принципов.

При анализе общей надежности технической системы необходимо учитывать все аспекты деятельности человека, в том числе его положительные стороны, ограничения, возможности, области улучшения [39–42]. Если человек является частью сложной технической системы с обеспечением безопасности, то все возможные неблагоприятные последствия отказов из-за ЧФ (ошибок нарушений, упущений или злонамеренные действия) крайне важны. В стандарте описаны только качественные методы и приведена краткая информация о зарубежных количественных методах. До настоящего времени вопрос разработки практических руководств по количественной оценке ЧФ остается открытым.

Система, для работы которой необходимо взаимодействие человека с машиной, включает в себя человека (операторов), машину (оборудование, механизмы), а также социальную и физическую среду, в которой происходит взаимодействие. Человек может участвовать в различных стадиях жизненного цикла технической системы, влиять на ее надежность посредством действий и решений согласно своим функциональным обязанностям (как проектировщик, составитель рабочих инструкций, функциональный

менеджер и наблюдатель, оператор, инструктор, персонал технического обслуживания и ремонта) [4, 39, 43–47].

Рассматривается методика оценки вероятности ошибки человека в условиях аварии с учетом внутренних и внешних факторов, степени неопределенности, которые могут влиять на надежность системы «человек-машина». В методике используется модель, основанная на методологии HRA. Определяется вероятность ошибки человека, сочетающая номинальную ошибку и влияние окружающей среды, которая сравнивается с заданным допустимым предельным значением, зависящим от состояния системы. Это позволяет осуществлять мониторинг и корректировку технического состояния системы.

Принятые обозначения и определения:

- HEP (Human error probability) – вероятность ошибки человека,
- KPIs (Key performance indicators) – ключевые показатели эффективности,
- PSFs (Performance shaping factors) – факторы, определяющие эффективность (работоспособность) системы,
- PSF – фактор, определяющий работу (человека),
- GTTs (Generic task human factors) – человеческие факторы в общей задаче,
- HRA (Human Reliability Analysis) – анализ надежности человека.

Оценка вероятности ошибки человека в условиях аварии

Исходные данные:

Число лиц (операторов), принимающих участие в работе системы – n .

Время работы n -го оператора – t_n .

Параметр $\beta=1,5$.

Параметр, характеризующий надежность n -ого оператора – k_n .

Характеристики влияния внешних факторов (окружающей среды) на надежность человека – коэффициенты PSFs: PSF1, PSF2, ..., PSF m .

Число внешних факторов – m .

Параметр, описывающий окружающую среду – PSF $_{comp}$.

Допустимое предельное значение вероятности ошибки человека – HEP $_{lim}$.

Основные этапы методики

В соответствии с [8], можно выделить два этапа.

Этап 1. Задание числа n лиц (операторов), которые могут быть причастны к аварии (причинами аварии могут быть: случайность; отказ системы; ошибка человека и т.д.). Установление общего числа человеческих факторов GTTs в задаче (GTT1, GTT2, GTT3, ... GTT n).

Этап 2. Оценка вероятности ошибки человека с учетом внутренних и внешних факторов, которые могут повлиять на его надежность.

В методике используется гибридная модель, основанная на методологии HRA и учитывающая:

- 1) внутренние человеческие факторы (на основе применения функции Вейбулла),
- 2) внешние факторы, связанные с условиями окружающей среды (с помощью факторов PSFs, определяющих эффективность (работоспособность) системы).

В первом случае функция Вейбулла позволяет определить вероятность человеческой ошибки с учетом различия между первым часом работы оператора и другими периодами:

$$HEP_{nom}(t_n) = 1 - k_n \cdot e^{-\alpha(1-t_n)^\beta}, \forall t_n \in [0; 1], \quad (1.3.1)$$

$$HEP_{nom}(t_n) = 1 - k_n \cdot e^{-\alpha(t_n-1)^\beta}, \forall t_n \in]1; \infty[, \quad (1.3.2)$$

где

HEP_{nom} – номинальная вероятность ошибки человека, зависящая только от его поведения,

t_n – момент работы оператора,

k_n – параметр, характеризующий надежность n -го оператора,

β – параметр, характеризующий форму кривой надежности (отмечается [4], что наилучшим образом поведение человека характеризует функция Вейбулла с параметром β , равным 1,5),

α – параметр, зависящий от надежности n -го оператора (значения k_n):

$$\alpha_n = \frac{-\ln[k_n]}{(t_n - 1)^\beta} T \quad (1.3.3)$$

На рисунках 1.3.1, 1.3.2 представлено 6 графиков смеси двух распределений Вейбулла при различных сочетаниях параметров k_n и α для определения вероятности человеческой ошибки на интервалах от 0 до 1 и от 1 до 8 часов работы оператора.

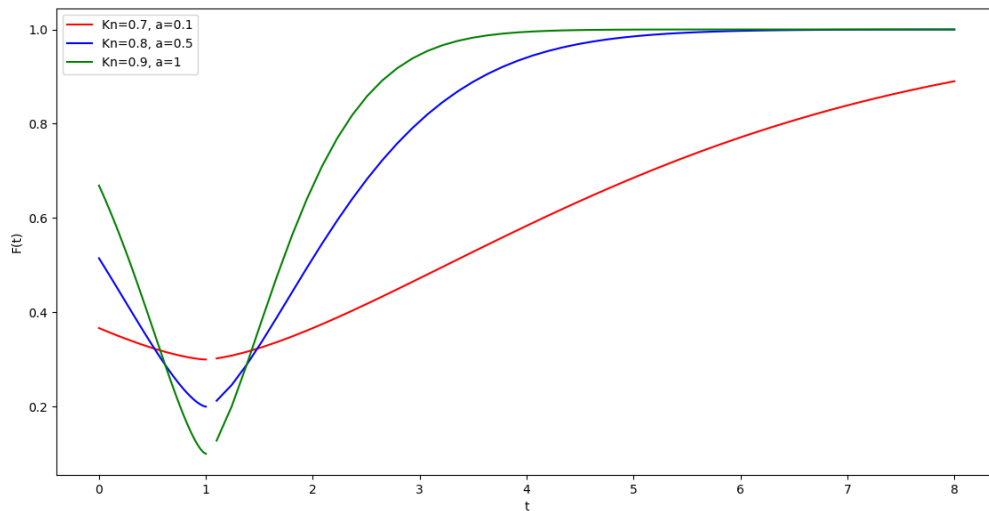


Рисунок 1.3.1 – Смесь двух функций Вейбулла для определения вероятности человеческой ошибки

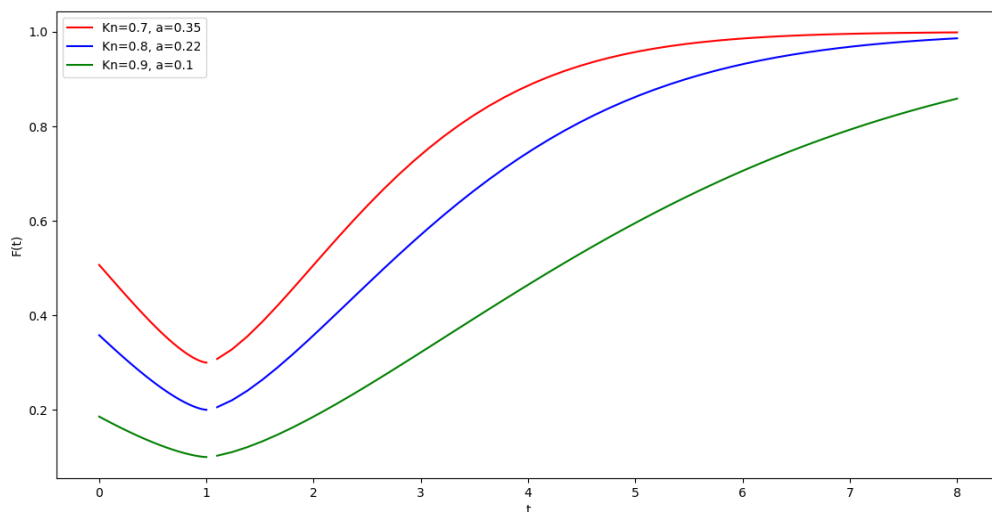


Рисунок 1.3.2 – Смесь двух функций Вейбулла для определения вероятности человеческой ошибки

Рассчитанная *номинальная* вероятность ошибки человека учитывает только *внутренние* факторы.

Во втором случае в модели учитывается влияние на надежность операторов *внешних* факторов окружающей среды с помощью введения коэффициентов PSFs ($PSF_1, PSF_2, \dots, PSF_m$) [4, 39]. Произведение всех PSFs определяет *общее* влияние на операторов окружающей среды:

$$PSF_{\text{comp}} = PSF_1 \cdot PSF_2 \cdot \dots \cdot PSF_m \quad (1.3.4)$$

Вероятность ошибки человека, сочетающая номинальную ошибку и влияние окружающей среды, определяется по формуле [4]

$$HEP_{cont} = \frac{HEP_{nom} \cdot PSF_{comp}}{HEP_{nom} \cdot (PSF_{comp} - 1) + 1}, \quad (1.3.5)$$

где

HEP_{cont} – вероятность ошибки человека, зависящая от его поведения и окружающей среды,

HEP_{nom} – номинальная вероятность ошибки человека, зависящая только от его поведения,

PSF_{comp} – параметр, описывающий общее влияние на операторов окружающей среды.

Этап 3. Сравнение значения вероятности ошибки человека HEP_{cont} с заданным допустимым предельным значением HEP_{lim} , зависящим от состояния системы.

Если значения HEP_{cont} и HEP_{lim} близки, то система не нуждается в усовершенствовании (улучшении). В противном случае оно необходимо для того, чтобы уменьшить вероятность человеческой ошибки.

Этап 4. Установление набора KPIs для анализа системы (в частности, KPIs должны касаться внешних факторов, влияющих на вероятность ошибки человека). Если влияние факторов PSFs, представляющих условия окружающей среды, поддается измерению, то их можно использовать как KPIs (в противном случае необходимо преобразовать их в измеримые элементы).

Этап 5. Усовершенствование системы осуществляется для того, чтобы уменьшить вероятность ошибки человека. При этом контроль коэффициентов KPIs выполняется, например, с помощью приборной панели, позволяющей отслеживать значения KPIs.

Этап 6. На этом этапе оценивается новая вероятность ошибки человека и проверяется степень улучшения (усовершенствования) системы. Если в этом случае вероятность ошибки человека HEP_{cont} меньше заданного предельного значения HEP_{lim} , то эта вероятность считается приемлемой, а проведенные мероприятия по улучшению системы успешными.

Выводы

Разработана методика оценки вероятности ошибки человека в условиях аварий, основанная на методологии HRA, учитывающей человеческие (на основе применения смеси функции распределения Вейбулла) и внешние факторы, связанные с условиями окружающей среды (с использованием таблицы факторов, определяющих эффективность (работоспособность) системы. Функция Вейбулла позволяет определить вероятность человеческой ошибки с учетом различия между первым часом работы оператора и другими периодами.

Необходимы дальнейшие исследования по моделированию поведения человека в стрессовых ситуациях для различных профессий. Представляется актуальным разработка алгоритма данной методики и его программной реализации для критичных инфраструктур различного профиля. Методика может стать практическим руководством для лиц, принимающих решения; при подготовке персонала к действиям в чрезвычайных ситуациях, полезной для оценки влияния человеческого фактора при эксплуатации критичных инфраструктур различного назначения. До настоящего времени нет нормативного документа, регламентирующего поведение человека при авариях количественными методами, поэтому методика частично может восполнить этот пробел.

1.3.3 Оценка функций риска, надежности и вероятности ошибки человека

Рассматривается задача оценки риска, надежности и вероятности ошибки человека, в приложении к энергосистемам. В исследовании [48] показано влияние ЧФ на надежность работы системы вследствие несовершенного обслуживания, вызванного человеческими ошибками.

Решение задачи проводится на основе *ковариационного* анализа – совокупности методов математической статистики, применяемых при изучении взаимосвязи набора независимых категориальных переменных (*факторов*) и независимых количественных переменных – *ковариат*.

Отмечается, что введение *ковариат* позволяет оценить их влияние на взаимодействие зависимой переменной и *факторов*, при этом, чем больше коэффициент влияния для *фактора*, тем большее влияние оказывает этот *фактор* на надежность человека и тем более вероятны человеческие ошибки.

Постановка задачи

Используется аналитическое представление [49] для *функции риска* $h(t, \mathbf{Z})$:

$$h(t, \mathbf{Z}) = h_0(t)\psi(\mathbf{Z}), t \geq 0, \quad (1.3.6)$$

где

t – время,

$\mathbf{Z} = [z_1, z_2, \dots, z_k]$, z_i ($i=1, 2, \dots, k$) – ковариаты,

k – число ковариат,

$h_0(t)$ – базовая функция, характеризующая изменение надежности человека,

$\psi(\mathbf{Z}) = \exp(\gamma\mathbf{Z}) = \exp(\sum_{i=1}^k \gamma_{ij}z_i)$ – функция связи, введенная для учета влияния

ковариат $z_1 \div z_k$ на надежность человека,

γ_{ij} – весовые коэффициенты для ковариат z_i , $i=1, 2, \dots, 5$; $j=1, 2, \dots, n$, где n – число рассматриваемых случаев.

Произведено обобщение алгоритма для 5 ковариат на случай с произвольным числом ковариат.

Учитывается и влияние ковариат: предполагается, что коэффициент влияния каждой ковариаты может принимать одно из трех значений – 0, 1 или 2.

Для базовой функции в соответствии с рекомендациями [50, 51] принято распределение Вейбулла:

$$h_0(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \quad (1.3.7)$$

с параметрами $\alpha = 200$ ч, $\beta = 3$.

Необходимо оценить функции:

1) риска для человека:

$$h(t, \mathbf{Z}) = h_0(t)\psi(\mathbf{Z}), t \geq 0. \quad (1.3.8)$$

2) надежности человека:

$$R_{hp}(t) = \exp \left[- \int_0^t h(s, \mathbf{Z}) ds \right] = \exp \left[- \int_0^t \frac{\beta s^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \exp(\gamma\mathbf{Z}) ds \right] \quad (1.3.9)$$

Функция надежности человека $R_{hp}(t)$ выражает вероятность того, что до момента времени t человеком не будет допущена ошибка.

3) вероятности ошибки человека:

$$F_{hp}(t) = 1 - R_{hp}(t) \quad (1.3.10)$$

Решение задачи

Рассмотрены различные варианты.

Вариант 1.

В случае *энергосистем* в качестве ковариат рассматриваются $z_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ [50], характеризующие следующие различные факторы:

- z_1 – сложность задачи,
- z_2 – факторы среды,
- z_3 – знание и опыт человека,
- z_4 – психология человека,
- z_5 – физическое состояние человека.

Значения весов (весовых коэффициентов) для описанных выше ковариат получены на основе процесса аналитической иерархии [52].

Следует подчеркнуть, что:

- в рамках данного алгоритма возможно рассматривать ковариаты $z_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ и для других характеризующих их факторов. Важно, чтобы коэффициенты влияния и весовые значения соответствовали этим новым факторам,
- в рассмотренных ниже примерах мы сами назначаем коэффициенты влияния ковариат и их весовые значения (при обсуждении конкретных случаев необходимые данные можно получить на основе экспертных оценок).

По данным [50] приняты значения: $\beta = 3$, $\alpha = 200$ ч (они получены путем статистического анализа для обсуждаемой в первоисточнике задачи).

В вариантах 1 и 2 учтены 5 ковариат, характеризующих указанные выше факторы, с разными *коэффициентами влияния* ковариат и *весовыми значениями* в рассматриваемых случаях.

Поскольку *в общем случае*, как можно предположить, возникает необходимость оценить (помимо 5 ковариат) влияние ряда дополнительных ковариат ($z_6, z_7 \dots, z_m$), рассмотрен и *частный случай* при $m = 8$ (*варианты 3 и 4*). К набору z_1, z_2, \dots, z_5 добавлены еще три ковариаты - z_6, z_7, z_8 .

Предположим, что они характеризуют соответственно:

z_6 – возможность возникновения эффекта домино (ЭД),

z_7 – присутствие коррозионно-активной среды,

z_8 – уровень автоматизации производства.

Для конкретной задачи следует выяснить (в т.ч. с привлечением экспертов) все возможные варианты ковариат.

Результаты расчета

Результаты расчета для различных вариантов и случаев представлены в таблицах 1.3.1–1.3.5 и на рисунках 1.3.3–1.3.20.

Вариант 1.

Таблица 1.3.1 – Случай для $\alpha = 200$, $\beta = 3$, $t = 10-60$ ч

Ковариаты z_i ($i=1, \dots, 5$)	Коэффициенты влияния ковариат в рассматриваемых случаях $z_{i,j}$ ($j=1, 2, 3$)			Весовое значение i -й ковариаты в j -м случае, γ_{ij} , ($i=1, 2, \dots, 5$)
	Случай 1, $j=1$	Случай 2, $j=2$	Случай 3, $j=3$	
z_1	1	1	1	0,27
z_2	0	1	2	0,18
z_3	0	1	2	0,22
z_4	1	1	2	0,15
z_5	0	1	2	0,18

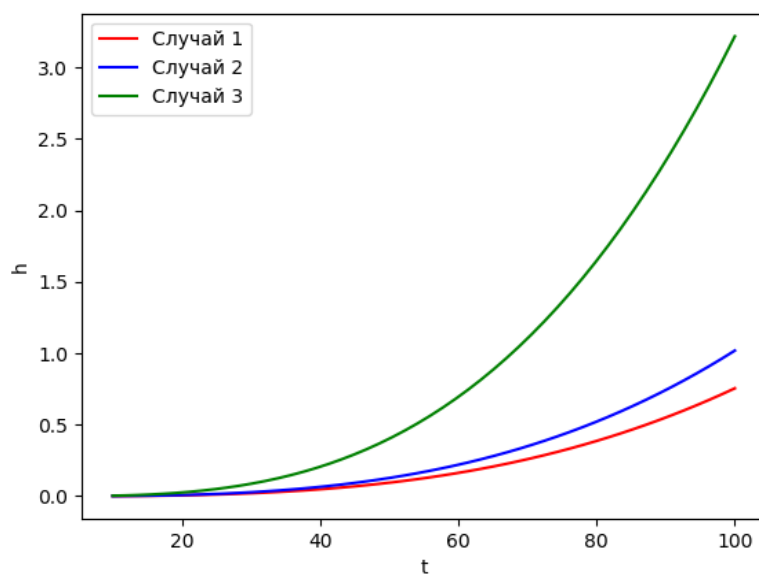


Рисунок 1.3.3 – Функции риска для человека в рассматриваемых случаях – $h(t, \mathbf{Z})$

На всех рисунках по горизонтальной оси представлено время t , ч, по вертикали – название рассматриваемой функции, в данном случае $h(t, \mathbf{Z})$.

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(0.7), t \geq 0 - 1 \text{ случай}$$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(1), t \geq 0 - 2 \text{ случай}$$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(2.15), t \geq 0 - 3 \text{ случай}$$

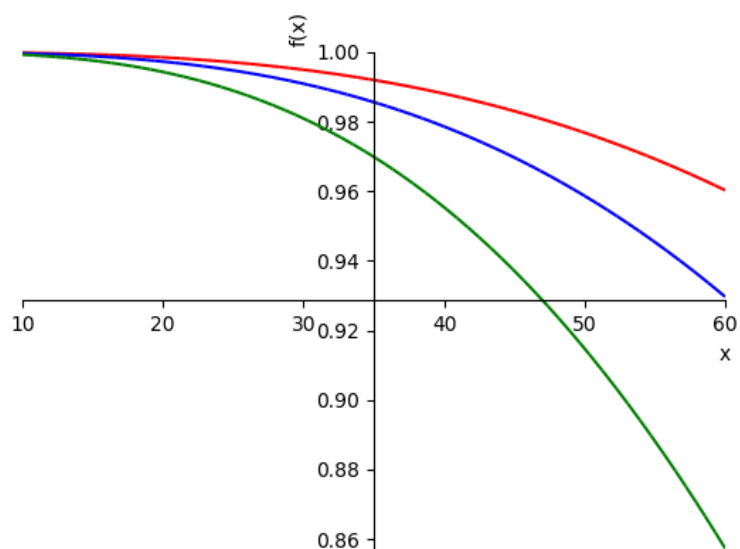


Рисунок 1.3.4 – Функции надежности человека в рассматриваемых случаях – $R_{hp}(t)$

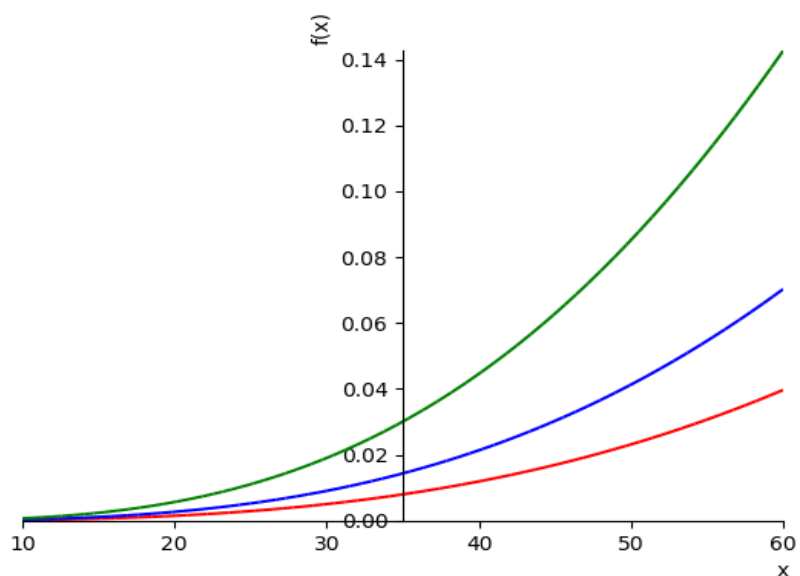


Рисунок 1.3.5 – Функции вероятности ошибки человека в рассматриваемых случаях –

$$F_{hp}(t)$$

$$R_{hp}(t) = \exp \left[- \int_0^t \frac{3*s^{3-1}}{200^3} \exp(0.42) ds \right] - 1 \text{ случай}$$

$$R_{hp}(t) = \exp \left[- \int_0^t \frac{3*s^{3-1}}{200^3} \exp(1) ds \right] - 2 \text{ случай}$$

$$R_{hp}(t) = \exp \left[- \int_0^t \frac{3*s^{3-1}}{200^3} \exp(1.73) ds \right] - 3 \text{ случай}$$

Вариант 2.

Таблица 1.3.2 – Случай для $\alpha = 200$, $\beta = 3$, $t = 10-100$ ч

Ковариаты z_i ($i=1, \dots, 5$)	Коэффициенты влияния ковариат в рассматриваемых случаях $z_{i,j}$ ($j=1, 2, 3$)			Весовое значение i -й ковариаты в j -м случае, γ_{ij} , ($i=1, 2, \dots, 5$)
	Случай 1, $j=1$	Случай 2, $j=2$	Случай 3, $j=3$	
1	2	3	4	5
z_1	1	1	2	0,2
z_2	0	1	1	0,25
z_3	1	1	2	0,3

Продолжение таблицы 1.3.2

1	2	3	4	5
z_4	1	0	2	0,2
z_5	0	1	2	0,25

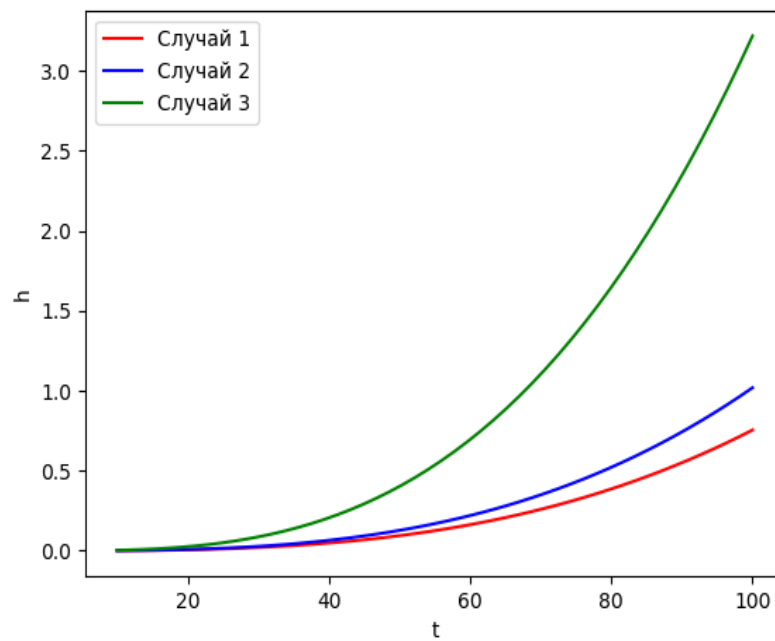


Рисунок 1.3.6 – Функции риска для человека – $h(t, Z)$

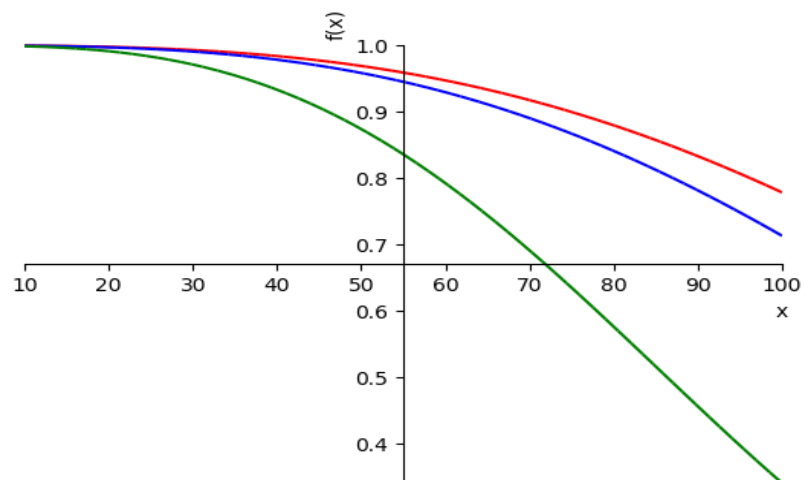


Рисунок 1.3.7 – Функции надежности человека – $R_{hp}(t)$

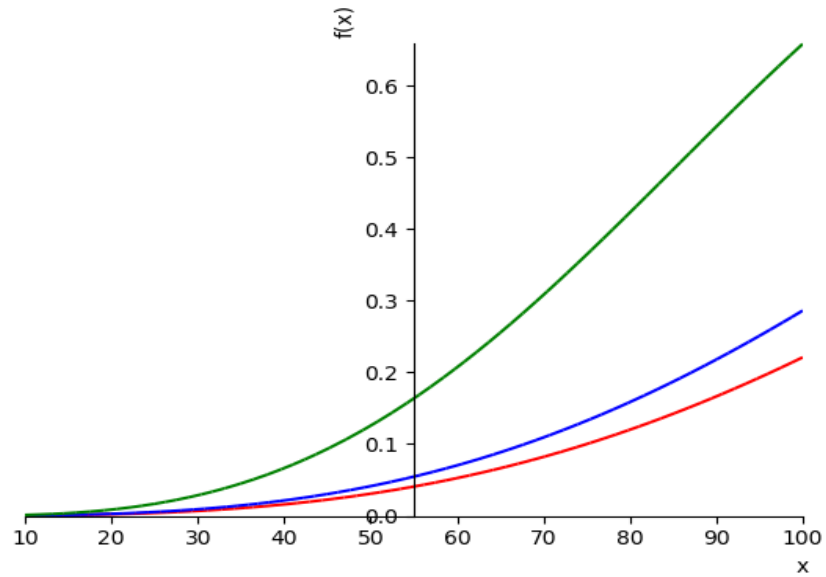


Рисунок 1.3.8 – Функции вероятности ошибки человека – $F_{hp}(t)$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(0.7), t \geq 0 - 1 \text{ случай}$$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(1), t \geq 0 - 2 \text{ случай}$$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(2.15), t \geq 0 - 3 \text{ случай}$$

Вариант 3.

Таблица 1.3.3 – Случай для $\alpha = 200, \beta = 3$

Ковариаты z_i ($i=1, \dots, 8$)	Коэффициенты влияния ковариат в рассматриваемых случаях $z_{i,j}$ ($j=1, 2, 3$)			Весовое значение i -й ковариаты в j -м случае, γ_{ij} , ($i=1, 2, \dots, 8$)
	Случай 1, $j=1$	Случай 2, $j=2$	Случай 3, $j=3$	
1	2	3	4	5
z_1	1	1	1	0,21
z_2	0	1	2	0,14
z_3	0	1	2	0,19

Продолжение таблицы 1.3.3

1	2	3	4	5
z_4	1	1	2	0,10
z_5	0	1	2	0,12
z_6	0	1	2	0,07
z_7	1	1	2	0,09
z_8	1	2	2	0,08

А) $t = 0-100$ ч

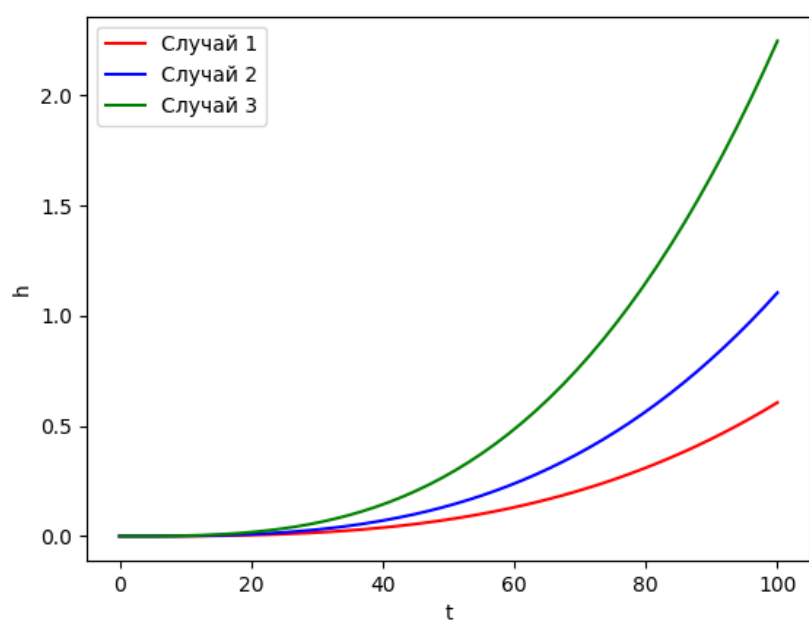


Рисунок 1.3.9 – Функции риска для человека – $h(t, Z)$

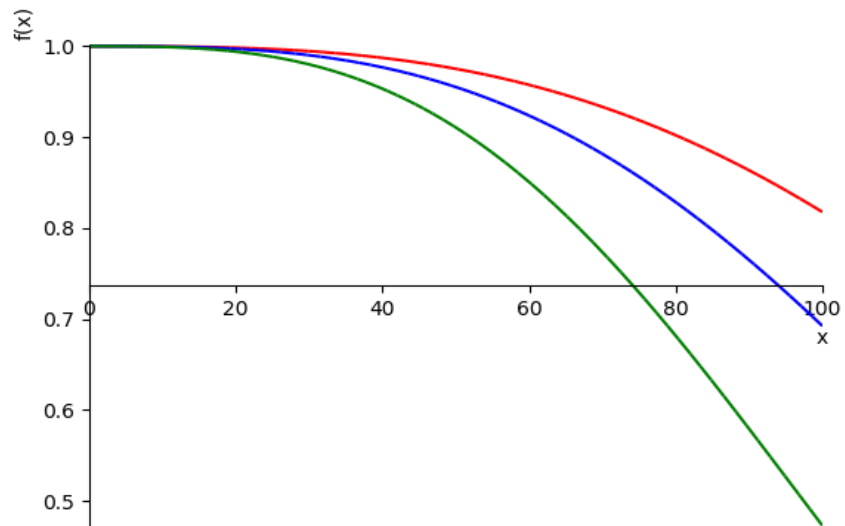


Рисунок 1.3.10 – Функции надежности человека – $R_{hp}(t)$

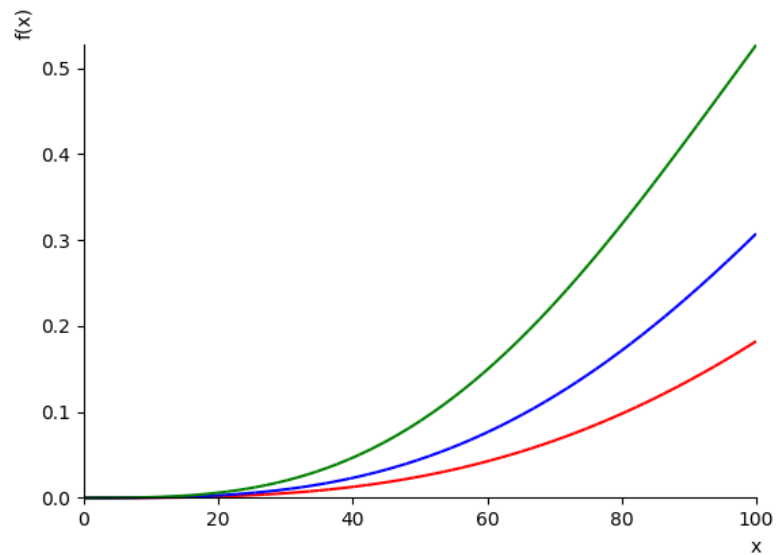


Рисунок 1.3.11 – Функции вероятности ошибки человека – $F_{hp}(t)$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(0.48), t \geq 0 - 1 \text{ случай}$$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(1.08), t \geq 0 - 2 \text{ случай}$$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(1.79), t \geq 0 - 3 \text{ случай}$$

B) $t = 0-200$ ч

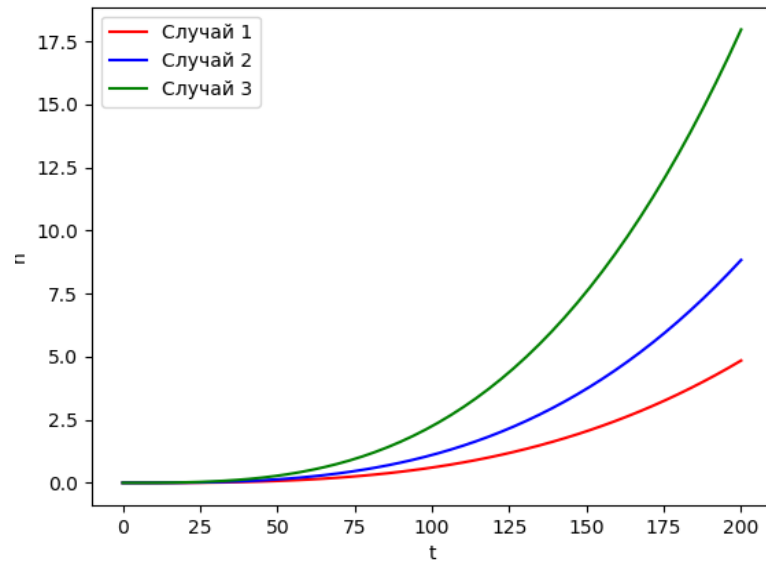


Рисунок 1.3.12 – Функции риска для человека – $h(t, \mathbf{Z})$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(0.48), t \geq 0 - 1 \text{ случай}$$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(1.08), t \geq 0 - 2 \text{ случай}$$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(1.79), t \geq 0 - 3 \text{ случай}$$

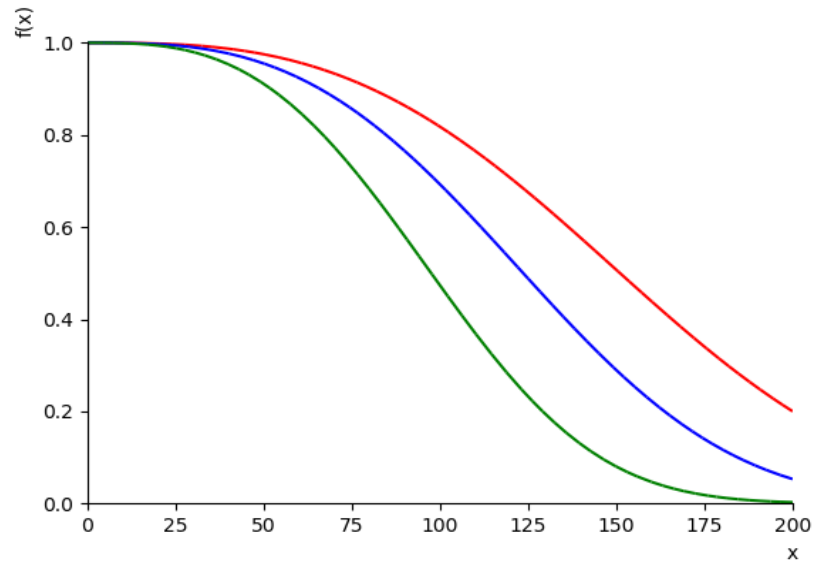


Рисунок 1.3.13 – Функции надежности человека – $R_{hp}(t)$

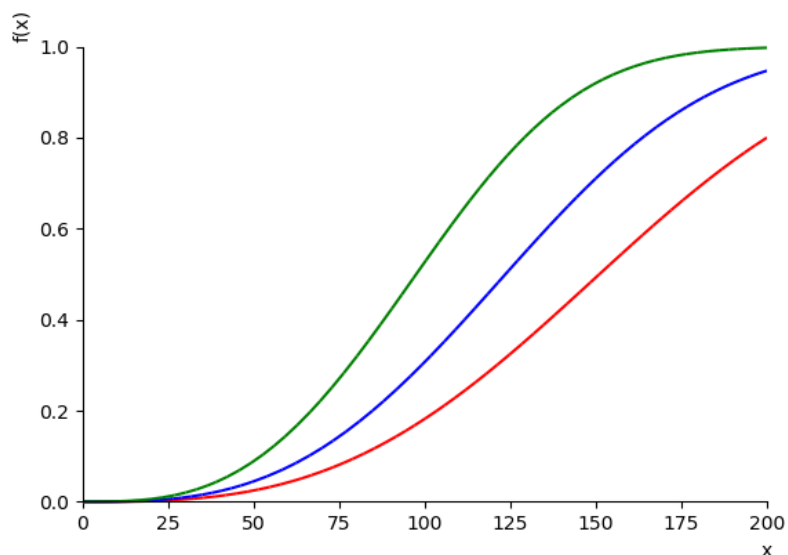


Рисунок 1.3.14 – Функции вероятности ошибки человека – $F_{hp}(t)$

Вариант 4.

Таблица 1.3.4 – Случай для $\alpha = 200, \beta = 3$

Ковариаты z_i ($i=1, \dots, 8$)	Коэффициенты влияния ковариат в рассматриваемых случаях $z_{i,j}$ ($j=1, 2, 3$)			Весовое значение i -й ковариаты в j -м случае, γ_{ij} , ($i=1, 2, \dots, 8$)
	Случай 1, $j=1$	Случай 2, $j=2$	Случай 3, $j=3$	
z_1	1	1	2	0,2
z_2	0	1	1	0,18
z_3	1	1	2	0,14
z_4	1	0	2	0,12
z_5	0	1	2	0,15
z_6	0	1	2	0,05
z_7	1	1	2	0,07
z_8	1	2	2	0,09

A) $t = 0-100$ ч

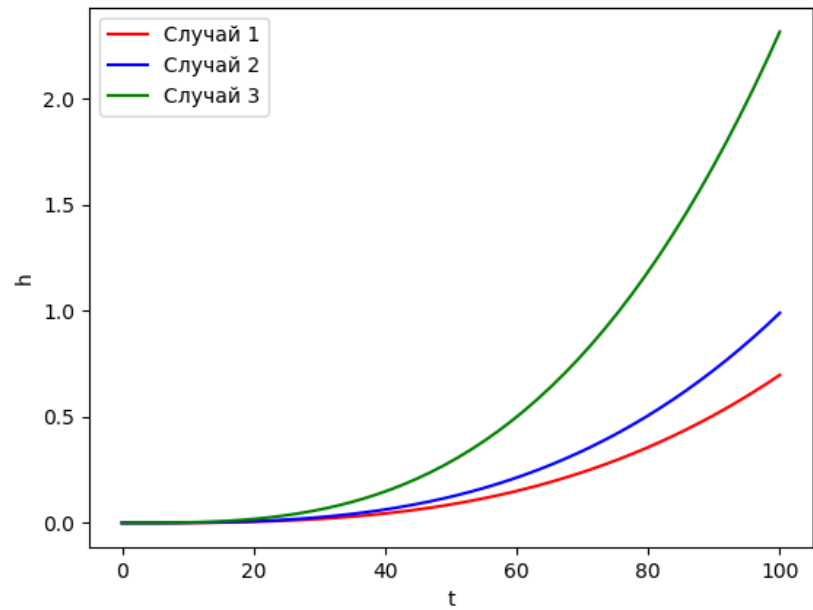


Рисунок 1.3.15 – Функции риска для человека – $h(t, \mathbf{Z})$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(0.62), t \geq 0 - 1 \text{ случай}$$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(0.97), t \geq 0 - 2 \text{ случай}$$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(1.82), t \geq 0 - 3 \text{ случай}$$

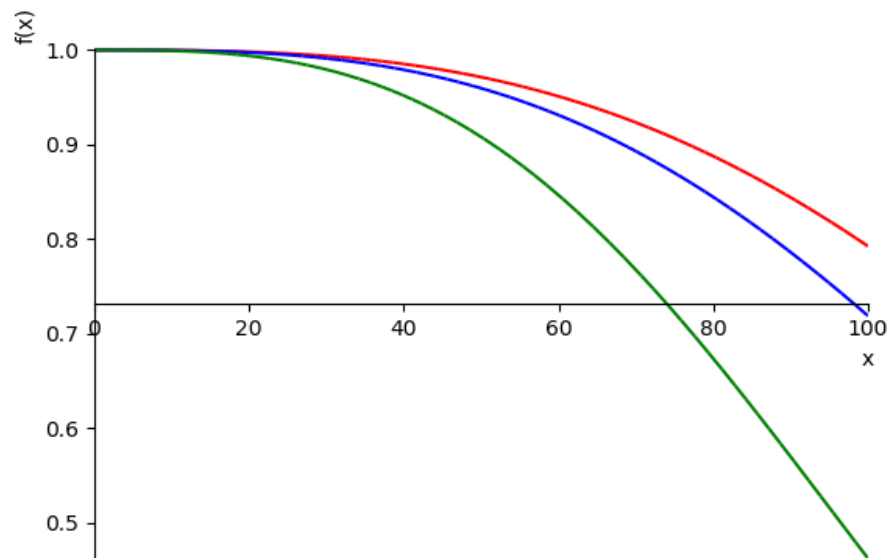


Рисунок 1.3.16 – Функции надежности человека – $R_{hp}(t)$

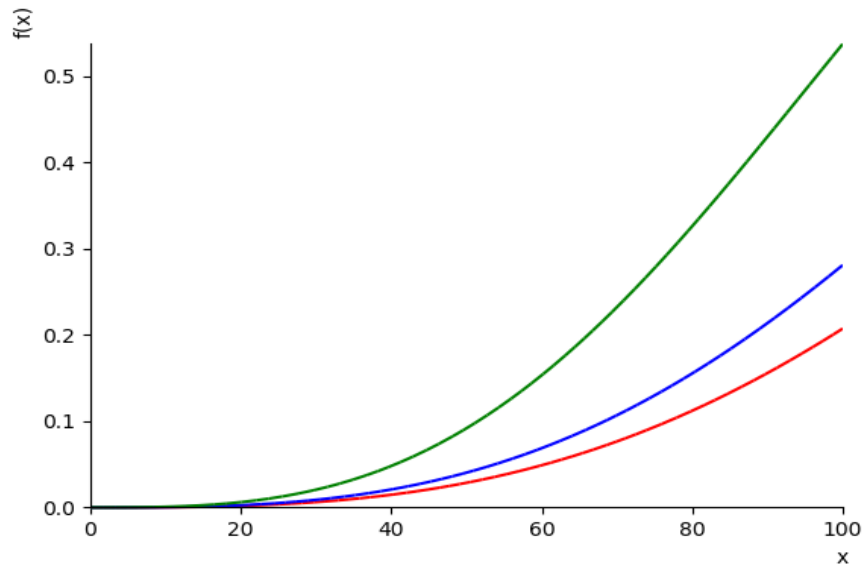


Рисунок 1.3.17 – Функции вероятности ошибки человека – $F_{hp}(t)$

В) $t = 0-200$ ч

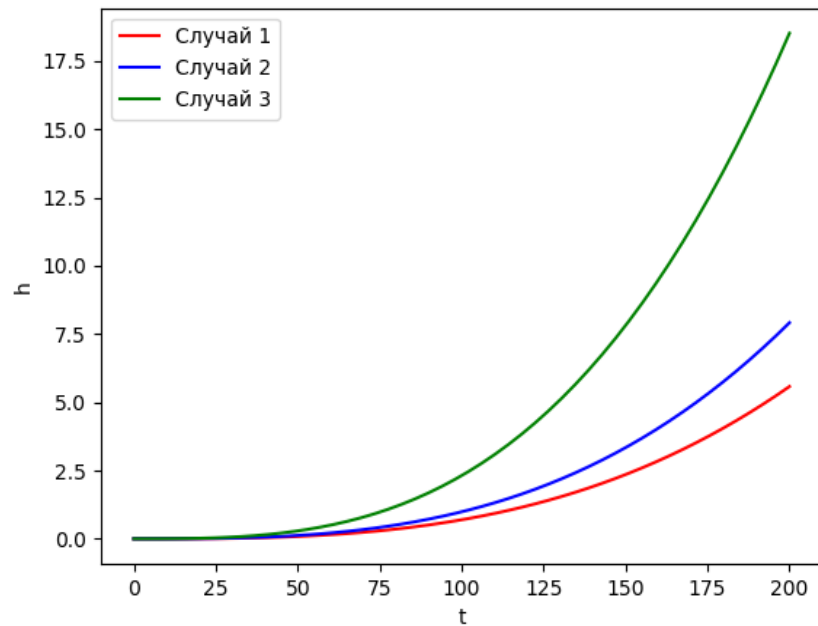


Рисунок 1.3.18 – Функции риска для человека – $h(t, \mathbf{Z})$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(0.62), t \geq 0 - 1 \text{ случай}$$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(0.97), t \geq 0 - 2 \text{ случай}$$

$$h(t, \mathbf{Z}) = \frac{3 \cdot t^{3-1}}{200^3} \exp(1.82), t \geq 0 - 3 \text{ случай}$$

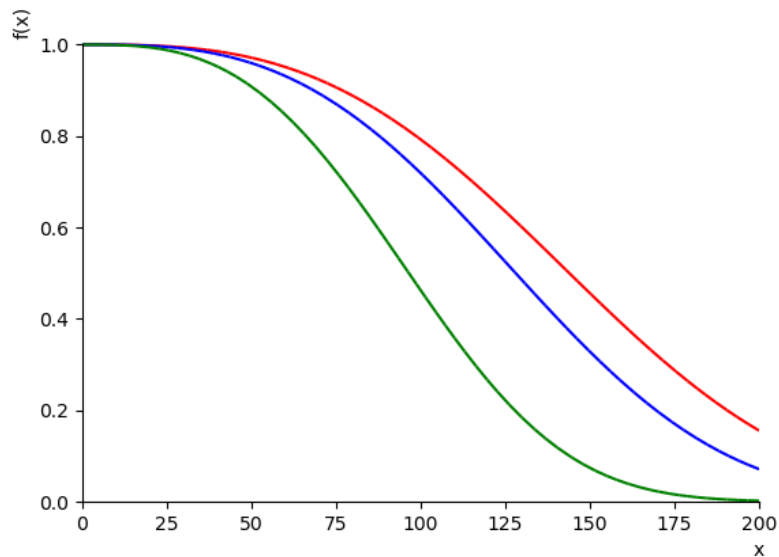


Рисунок 1.3.19 – Функции надежности человека – $R_{hp}(t)$

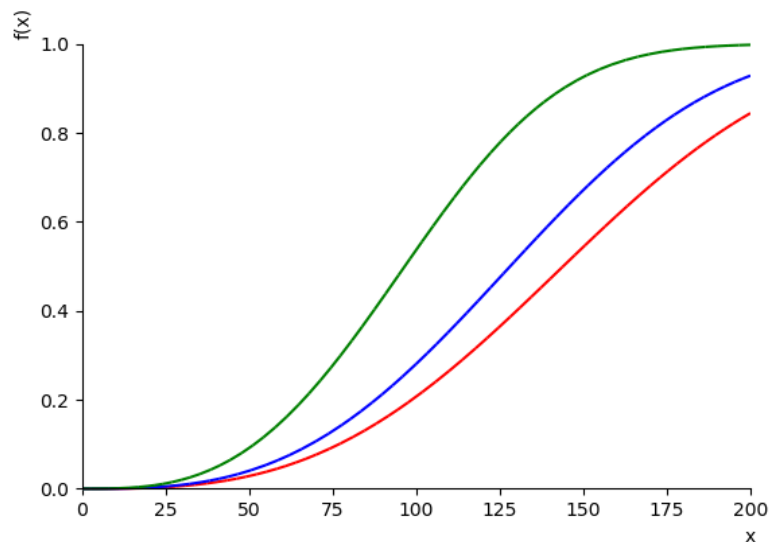


Рисунок 1.3.20 – Функции вероятности ошибки человека – $F_{hp}(t)$

Анализ результатов расчета

1. Рассматривается *Вариант 1* (таблица 1.3.1) для *пяти* ковариат z_i , ($i=1, \dots, 5$) с заданными в трех случаях *коэффициентами влияния* ковариат $z_{i,j}$ ($j=1, 2, 3$) и соответствующими *весовыми значениями* γ_{ij} .

При работе системы (энергосистемы) в течение $t = 10-60$ ч, в соответствии с формулами (1.3.8)–(1.3.10) проведены расчеты при значениях параметров $\alpha = 200$, $\beta = 3$

и построены графики функций (рисунки 1.3.3–1.3.5): *риска для человека* $h(t, \mathbf{Z})$, *надежности человека* $R_{hp}(t)$, *вероятности ошибки человека* $F_{hp}(t)$.

Далее выполнены расчеты для *Варианта 2* (таблица 1.3.2) при изменении *коэффициентов влияния* ковариат $z_{i,j}$ ($j = 1, 2, 3$), соответствующих *весовых значений* γ_{ij} и периода функционирования системы $t = 10\text{--}100$ ч (таблица 1.3.2). Графики функций $h(t, \mathbf{Z})$; $R_{hp}(t)$ и $F_{hp}(t)$ приведены на рисунках 1.3.6–1.3.8.

Отмечается, что значения функции вероятности ошибки человека $F_{hp}(t)$ к моменту $t = 100$ ч для рассматриваемых случаев находились в промежутке от 0,2 до 0,65, а к моменту $t = 60$ ч – в промежутке от 0,05 до 0,2 (в то время как для *Варианта 1* при $t = 60$ ч эти значения составляли от 0,04 до 0,141). Таким образом, при одном и том же числе ковариат наблюдается изменение, хотя и незначительное, в оценке вероятности ошибки человека.

2. В *Варианте 3* (таблица 1.3.3) предусматривалось включение трех дополнительных ковариат z_i ($i = 6, 7, 8$) с новыми значениями *коэффициентов влияния* ковариат z_i ($i = 1\div 5$) и *весовыми значениями* γ_{ij} .

Проведены расчеты при значениях $\alpha = 200$, $\beta = 3$ для времени функционирования системы $t = 0\text{--}100$ ч (рисунки 1.3.9–1.3.11) и $t = 0\text{--}200$ ч (рисунки 1.3.12–1.3.14).

Рассмотрен и другой вариант с восемью ковариатами (*Вариант 4*, таблица 1.3.4). О влиянии добавления ковариат и перераспределении при этом весов можно проследить при сопоставлении данных в таблице 1.3.5.

Судя по таблице 1.3.5 (*нижняя строка*), при работе системы (энергосистемы) в течение времени $t = 100$ ч для Варианта 4 в случаях 1, 2 и 3 *вероятность ошибки человека* $F_{hp}(t)$ равна соответственно 0,207; 0,28 и 0,54. То есть, в первых двух случаях (с пятью ковариатами) различие незначительное, а при добавлении трех новых ковариат *вероятность ошибки человека* возрастает от 0,207 до 0,54, так что различие составляет 2,6 раза (а для Варианта 2 – 3 раза).

Что касается функции надежности $R_{hp}(t)$, то для Варианта 4 ее значение уменьшается от 0,793 – в первом случае до 0,462 – в третьем случае, а в Варианте 3 – уменьшается от 0,818 до 0,473.

Таблица 1.3.5 – Надежность человека и вероятность его ошибки для разных вариантов и случаев

Варианты	Случаи (значения функций для разных t , ч)	Надежность			Вероятность ошибки		
		1 случай	2 случай	3 случай	1 случай	2 случай	3 случай
Вариант 1	4	0.99998	0.999978	0.99995	1.199e-5	2.16e-5	4.56e-5
	8	0.99990	0.99982	0.9996	9.599e-5	0.00017	0.00036
	10	0.99981	0.999662	0.9993	0.00019	0.00034	0.0007
	50	0.977	0.959	0.915	0.0232	0.0413	0.085
	100	0.829	0.7136	0.490	0.1709	0.286	0.51
Вариант 2	4	0.999984	0.99997	0.99993	1.599e-5	2.16e-5	6.88e-5
	8	0.99987	0.99982	0.9994	0.00013	0.00017	0.00055
	10	0.99975	0.99966	0.9989	0.00025	0.00034	0.001
	50	0.969	0.959	0.874	0.0308	0.041	0.126
	100	0.779	0.714	0.341	0.221	0.286	0.659
Вариант 3	4	0.999987	0.99997	0.99995	1.288e-5	2.352e-5	4.792e-5
	8	0.999896	0.999811	0.9996	0.0001	0.00019	0.00038
	10	0.999798	0.99963	0.99925	0.0002	0.0004	0.00075
	50	0.975	0.955	0.911	0.025	0.0449	0.089
	100	0.818	0.692	0.473	0.18	0.308	0.527
Вариант 4	4	0.999985	0.99997	0.99995	1.49e-5	2.112e-5	4.94e-5
	8	0.99988	0.9998	0.9996	0.0001	0.00017	0.0004
	10	0.999767	0.99967	0.99923	0.0002	0.00033	0.00077
	50	0.97136	0.960	0.908	0.029	0.04	0.092
	100	0.793	0.719	0.462	0.207	0.28	0.54

Выводы

1. Дано обобщение известного подхода на основе *ковариационного анализа* (в приложении к энергосистемам) на случай с произвольным числом ковариат.

2. При рассмотрении взаимосвязи набора независимых категориальных переменных – *факторов* и независимых количественных переменных – *ковариат* для различных вариантов и случаев (относительно числа ковариат, их коэффициентов влияния и *весовых значений*) построены графики функций *риска*, *надежности человека*, *вероятности его ошибки*.

3. Введение в рассмотрение ковариат и обобщение на случай произвольного числа ковариат позволяет оценить их влияние, а также соответствующих им факторов на оценки функций – *риска*, *надежности человека* и *вероятности его ошибки*.

4. Графики, построенные по результатам расчетов для разных вариантов и случаев, наглядно показывают, что чем больше коэффициент влияния для *ковариаты* и чем больше ее *весовое значение*, тем большее влияние оказывает соответствующий *фактор* на надежность человека, его риск и тем более вероятны человеческие ошибки.

5. О влиянии числа рассматриваемых ковариат и перераспределения их весовых вкладов на надежность и вероятность ошибки человека можно судить по результатам расчета для случаев с пятью и восемью ковариатами.

6. Значение *функции надежности* $R_{hp}(t = 100)$ для *Варианта 4* по истечении 100 часов работы системы уменьшается значительно: от 0,793 – в первом случае до 0,462 – в третьем случае (для *Варианта 3* – уменьшение от 0,818 до 0,473).

Для *вероятности ошибки человека* в первых двух случаях (*Варианты 1* и *2* – с пятью ковариатами) различие значений $F_{hp}(t = 100)$ не столь велико, а при добавлении трех новых ковариат (*Вариант 4*) значение $F_{hp}(t = 100)$ существенно возрастает от 0,207 до 0,54, так что различие составляет 2,6 раза (а для *Варианта 2* – 3 раза).

2 Алгоритм и расчеты демографических констант для различных регионов и территорий страны на основе таблиц дожития и учета последствий техногенных и/или природных инцидентов (число, гендерный состав, возраст и уровень образования/компетенции жертв аварий и катастроф)

2.1 Введение

Суть проблемы состоит в том, что при формулировке задачи необходимо количественно оценить *осязаемые* (экономические, материальные и др.) последствия потери человеческих жизней, стоимость увечий, телесных повреждений и потери здоровья, нарушения экологического баланса при функционировании СТО. При этом необходимо *спрогнозировать* эти потери для *будущих поколений*.

Такой прогноз неизбежно приводит к необходимости использовать математический аппарат макроэкономики и смежных дисциплин, которые, таким образом, входят в базу фундаментальных знаний инфранетики. В частности, далее понадобятся сведения из теории полезности потребления и теории дисконтирования. Также понадобятся функция полезности жизни, определения и формулировка индекса качества жизни, готовности платить, статистической стоимости жизни, стоимости спасения одной жизни.

Кроме того, для решения задачи понадобится аппарат математической демографии, и в частности, методы оценки смертности, оценки средней ожидаемой продолжительности жизни (СОПЖ) и остаточного времени жизни, таблицы дожития.

В данной работе дается краткий анализ состояния вопроса и проверка правильности выведения всех основных формул, необходимых для управления региональным риском. Данная работа выполнялась по конвергентной схеме MAICS-технологий (Mechanics, Artificial Intelligence, Information Theory, Cognitive Science, Social Science), что позволило, по-видимому, впервые выявить и, по необходимости, решить ряд новых задач, из области актуарной математики и теоретической демографии.

2.2 Необходимые теоретические сведения из макроэкономики и демографии

2.2.1 Основы теории дисконтирования

Решение выделить ресурсы на реализацию какой-либо определенной программы означает, что поток социальных ценностей вырабатывается для будущего, тогда как общество отвлекает ресурсы, которые могли быть использованы для потребления в настоящем. Достаточно ли высоки будущие социальные ценности для того, чтобы компенсировать уменьшение сегодняшнего потребления? Ответ на этот вопрос и дает дисконтирование.

Дисконтированная (приведенная, текущая) стоимость – оценка стоимости (текущий денежный эквивалент) будущего потока платежей исходя из различной стоимости денег, полученных в разные моменты времени (концепция временной ценности денег). Денежная сумма, полученная сегодня, обычно имеет более высокую стоимость, чем та же сумма, полученная в будущем. Это связано с тем, что деньги, полученные сегодня, могут принести в будущем доход, если их инвестировать. Кроме того, деньги, полученные в будущем, в условиях инфляции обесцениваются (на ту же сумму в будущем можно приобрести меньшее количество товаров и услуг). Также есть другие факторы, снижающие стоимость будущих платежей. Неравноценность разновременных денежных сумм численно выражается в *ставке дисконтирования*.

Учет фактора времени предполагает необходимость сравнения денежных сумм в различные периоды. Метод дисконтирования предполагает приведение будущих поступлений к настоящему моменту времени.

Рассмотрим вопрос о начислении сложных процентов и дисконтировании денежных потоков в непрерывном времени. В процессе дисконтирования используется экспоненциальная функция, причем показателем экспоненты является произведение времени на непрерывную ставку. Экспоненциальное дисконтирование – это метод, который позволяет сравнить адекватность выбора с учетом фактора времени. Он получил широкое распространение из-за своей простоты.

Экспоненциальная функция возникает из механизма начисления сложных процентов. При ежегодной выплате первоначальный вклад возрастает через t лет в $(1 + \gamma)^t$ раз, где γ – процентный доход за единицу времени. Если проценты начисляются N раз в год, то рост первоначального вклада за t лет составит $\left(1 + \frac{\gamma}{N}\right)^{Nt}$ раз (коэффициент

наращения). При непрерывной выплате процентов, когда число выплат устремляется к бесконечности, в пределе возникает экспонента:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{\gamma}{N}\right)^{Nt} = e^{\gamma t}.$$

Процедура дисконтирования обратна механизму начисления сложных процентов, то есть коэффициент (фактор) дисконтирования равен

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\left(1 + \frac{\gamma}{N}\right)^{Nt}} = e^{-\gamma t}, \quad (2.2.1)$$

где γ называется ставкой дисконтирования (процентной ставкой).

Реализация социальной политики в стране предполагает осуществление государственных инвестиций, направленных на решение социально значимых задач. В условиях ограниченности бюджетных ресурсов неизбежно возникает проблема выбора проектов, подлежащих финансированию, из множества запросов на инвестиции, представленных на рассмотрение ЛПР. При осуществлении инвестиций в *частном* секторе общепризнанным критерием оценки является чистая текущая стоимость проекта. Применение данного критерия для оценки проектов *общественного* сектора подразумевает определение получаемых социальных выгод в денежном выражении и издержек, а также соотнесение их во времени с бюджетными издержками. Однако общественные выгоды от реализации проекта нередко являются нематериальными (например, снижение заболеваемости населения, улучшение экологической обстановки и т.п.), и напрямую денежной оценке не поддаются. Основной объем требуемых инвестиций, как правило, приходится на начальный этап реализации проекта, в то время как предполагаемые социальные эффекты появляются только через некоторый период времени. В качестве инструмента, позволяющего сравнивать полученные обществом выгоды и понесенные издержки, рыночная ставка дисконтирования неприменима. В мировой экономической практике таким инструментом является ставка социального (общественного) дисконтирования [1].

Социальная ставка дисконтирования – это альтернативная возможность использования обществом ресурсов между двумя периодами времени, своего рода «цена»,

по которой общество готово отказаться от сегодняшнего потребления ради завтрашнего, которая отражает социальную норму временного предпочтения.

Различают два метода оценки социальной ставки дисконтирования. В данной работе используется метод оценки социальной ставки межвременных предпочтений (social rate of time preferences, SRTP), который основан на выявлении предпочтений общества в плане потребления. Социальная ставка межвременных предпочтений показывает готовность общества отказаться от потребления в настоящий момент времени ради реализации проекта и получения выгод от его результатов в будущем [1]. Выбор между потреблением сегодня и в будущем называется *эффектом замещения*.

Аналитически эта задача решается с помощью максимизации функции общественной полезности, получаемой от потребления в различные периоды времени. В общем случае, при переменной во времени ставки дисконтирования, эта задача имеет следующий вид:

$$U(t) = \int_0^t u(c_\tau) \exp \left[- \int_0^\tau \gamma(\theta) d\theta \right] d\tau \rightarrow \max_{c_t} \quad (2.2.2)$$

где

$c_t > 0$ – подушевое потребление в момент времени t ;

$u(c_t)$ – функция общественной полезности этого потребления,

$\gamma(t) > 0$ – процентная ставка дисконтирования полезности потребления в момент времени t , отражающая межвременные предпочтения индивида,

$U(t)$ – по сути, является функцией *совокупной полезности*.

Полезность (utility) – это степень удовлетворения потребностей индивидов, которую они получают при потреблении товаров или услуг или от ведения какой-либо деятельности.

Различают две формы полезности: общую и предельную. *Общая полезность* (total utility) – совокупная полезность, получаемая в результате потребления всех единиц блага. Общая полезность возрастает по мере увеличения потребления, но не пропорционально объему потребления, и постепенно затухает, пока не дойдет до нуля. *Предельная полезность* (marginal utility) – полезность, которую получают от использования еще одной дополнительной единицы блага. Другими словами, это увеличение общей полезности при

потреблении одной дополнительной единицы блага (то есть *производная функции полезности по количеству потребляемого блага*).

При решении задачи максимизации функции общественной полезности $u(c_t)$, получаемой от потребления c_t в различные периоды времени t , принимается *утилитарный* подход, согласно которому общественное благосостояние (общественная полезность) представляет собой сумму благосостояний (сумму полезностей) отдельных членов общества, а предельная полезность убывает по мере роста потребления (первый закон Госсена). Это так называемый *закон убывающей предельной полезности*, заключающийся в том, что с ростом потребления какого-то одного блага (при неизменном объеме потребления всех остальных благ) общая полезность, получаемая потребителем, возрастает, но скорость роста замедляется. Математически это означает, что первая производная функции общей полезности в зависимости от потребления данного блага положительна, но уменьшается, а вторая – отрицательна (рисунок 2.1). Иначе говоря, функция общей полезности возрастает и выпукла вверх. Эта выпуклость выражает стремление общества к сглаживанию потребления, то есть предпочтение отдается относительно однородному потреблению вместо потребления, которое высоко в одни периоды и низко в другие.

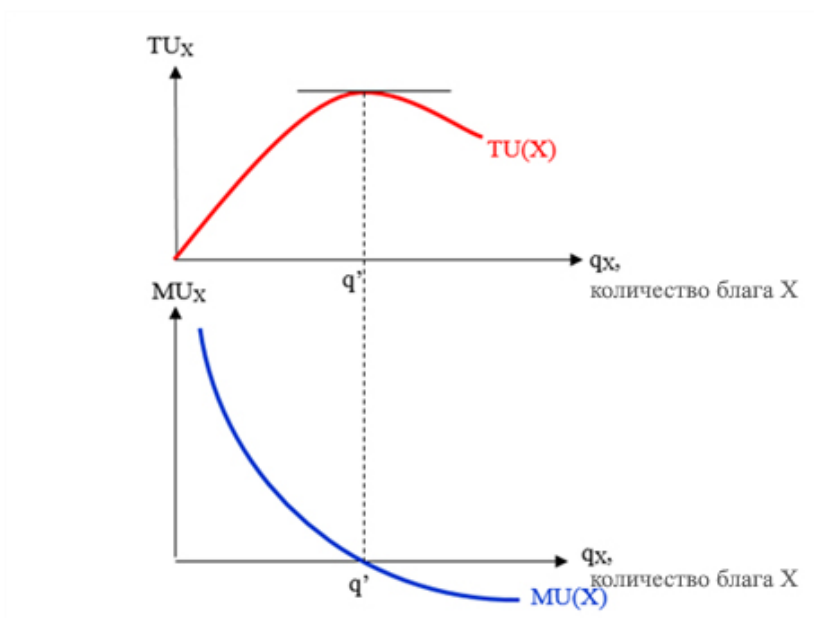


Рисунок 2.1– График функции общей полезности (TU) и предельной полезности (MU) в зависимости от количества потребляемого блага X

Предельная полезность (производная) убывает с ростом потребления, обращается в ноль при максимальной общей полезности и затем становится отрицательной, а общая

полезность, достигнув максимального значения, начинает уменьшаться. Например, для голодного человека предельная полезность первой тарелки супа выше, чем второй, второй – выше, чем третьей и т.д. Так и со многими другими благами.

2.2.2 Функция полезности (всей) жизни

Наслаждение жизнью или ее *полезность в экономическом смысле* [2] происходит за счет непрерывного притока ресурсов, доступных для потребления на протяжении всей жизни. Поэтому доходы, необходимые для потребления, и время, чтобы наслаждаться им, являются двумя определяющими факторами качества жизни. Согласно работам [2, 3], качество жизни в экономическом смысле можно измерить с помощью функции полезности продолжительности жизни, в зависимости от уровня потребления. Функция полезности остаточной (предстоящей) продолжительности жизни в возрасте x [2, 3]:

$$U(x, D) = \int_x^D u(c_\tau) d\tau, \quad (2.2.3)$$

где

$c_\tau > 0$ – скорость (*интенсивность*) потребления в возрасте τ (\$/год),

$u(c_\tau)$ – *полезность* этого потребления от возраста x до момента смерти D .

Функцию $U(x, D)$ можно интерпретировать как полное потребление в течение оставшейся жизни.

Люди обычно ценят возможность потребления в будущем меньше, чем в настоящем. Это может быть учтено через *дисконтирование функции полезности*:

$$U(x, D) = \int_x^D u(c_\tau) \exp\left[-\int_x^\tau \gamma(\theta) d\theta\right] d\tau, \quad (2.2.4)$$

где

$\gamma(t) > 0$ – процентная ставка дисконтирования полезности потребления в возрасте t , отражающая межвременные предпочтения индивидуума.

Как было отмечено выше, в качестве оценки $\gamma(t)$ используется социальная ставка дисконтирования. В данной работе используется так называемая математическая модель

Рамсея-Касса-Купманса (модель Рамсея) – неоклассическая модель равновесного эндогенного экономического роста, в которой траектория потребления и сбережений определяются на основе решения задачи оптимизации домашних хозяйств и фирм в условиях совершенной конкуренции.

Совершенная, или чистая, свободная конкуренция – экономическая модель, идеализированное состояние рынка, когда отдельные покупатели и продавцы не могут влиять на цену, но формируют её своим вкладом спроса и предложения. Другими словами, это такой тип рыночной структуры, где рыночное поведение продавцов и покупателей заключается в приспособлении к равновесному состоянию рыночных условий.

В модели Рамсея функция полезности является сепарабельной, т.е. полезность в каждый момент времени зависит только от потребления в этот момент. Кроме этого,

предельная полезность $\frac{du(c_t)}{dc_t}$ является положительной и убывающей функцией и

выполнены условия Инада – при стремлении потребления к нулю, предельная полезность стремится к бесконечности, а при стремлении потребления к бесконечности предельная полезность стремится к нулю (см. рисунок 2.1). Этим требованиям и существованию стационарного состояния (условиям совершенной конкуренции – идеального рынка) соответствует *изоэластичная степенная функция* вида

$$u(c_t) = \frac{c_t^{1-\mu}}{1-\mu}, \quad (2.2.5)$$

где

μ – эластичность предельной общественной полезности по потреблению (отражает *межвременную эластичность замещения*):

$$\mu = -\frac{u''(c_t)}{u'(c_t)} c_t. \quad (2.2.6)$$

Эта величина является положительной в силу положительности предельной полезности и отрицательности второй производной полезности (убывающая предельная полезность).

В экономике под понятием эластичности (elasticity) понимается мера чувствительности одной переменной (например: спроса или предложения) к изменению

другой (например: цены, дохода) и показывающая, на сколько процентов изменится первый показатель при изменении второго на 1%.

2.2.3 Социальная ставка дисконтирования

Решая задачу максимизации общественной полезности по потреблению:

$$U(x, t) = \int_x^t u(c_\tau) \exp \left[- \int_x^\tau \gamma(\theta) d\theta \right] d\tau \rightarrow \max_{c_t}, \quad (2.2.7)$$

согласно модели Рамсея [31], получим социальную ставку дисконтирования:

$$\gamma(t) = \rho(t) + \mu\delta(t), \quad (2.2.8)$$

где

$$\delta(t) = \frac{dc_t}{c_t} \frac{dt}{dt} \text{ – темп прироста потребления на душу населения,}$$

параметр $\rho(t)$ означает субъективную норму дисконтирования будущего потребления (параметр нетерпеливости, эгоизма). Чем больше этот параметр, тем выше ценит индивид свое сегодняшнее потребление по отношению к будущему. Компонента $\mu\delta$ показывает прирост общественной полезности, получаемой от потребления.

Таким образом, согласно выражению (2.2.8) социальная ставка межвременных предпочтений зависит от трех параметров: индивидуальной ставки межвременных предпочтений (ρ), эластичности предельной общественной полезности по потреблению (μ) и темпа роста потребления на душу населения (δ).

Pearce и Ulph [21] модернизировали уравнение (2.2.8), добавив в него параметр, отражающий изменение жизненного риска, поскольку реально существует вероятность не дожить до периода потребления в будущем. Таким образом, они разбили индивидуальную ставку дисконтирования ρ на две составляющие: r – «чистая» ставка межвременных предпочтений и l – уровень риска для жизни (учет вероятности не дожить до того момента, когда возможно отложенное потребление). Тогда социальная ставка дисконтирования:

$$\gamma = r + l + \mu\delta. \quad (2.2.9)$$

Некоторые экономисты (включая Рамсея) и философы считают, что ставка «чистых» межвременных предпочтений r равна нулю. Как правило, все они исходили из этических соображений, считая несправедливым занижение благосостояния будущих поколений, то есть не делали предпочтения, выраженного в потреблении, ни одному из поколений. Однако, при назначении нулевой ставки дисконтирования появляется вероятность чрезмерного смещения межвременного распределения потребления в пользу будущих поколений: усиление бедности одного поколения ради увеличения благосостояния следующих. Поэтому считается, что этот компонент ставки социальных временных предпочтений практически не поддается эмпирическому анализу. В некоторых известных исследованиях предлагается диапазон значений 0,0–0,5 [12], соответствующий ситуации в высокоразвитых странах, таких как Великобритания и США.

При оценке риска для жизни за основу взят риск неполучения обществом доходов от проекта в будущем. Данный риск определяется вероятностью того, что среднестатистический член общества не доживет до момента появления выгод от реализации проекта. Существующие исследования [21], [22], [23] рекомендуют оценивать данный параметр при помощи общего коэффициента смертности (в годовом исчислении):

$$l = \frac{\text{Общее количество смертей}}{\text{Численность населения}}. \quad (2.2.10)$$

Параметр l также может быть интерпретирован как риск катастрофы, т. е. вероятность, что случится событие, носящее разрушительный характер, в результате которого все результаты социально-технической политики, программ развития или проектов инфраструктур будут уничтожены или, по крайней мере, радикально и непредсказуемо изменены.

Следует отметить, что в развитых странах социальная ставка дисконтирования оценивается с начала XX в., поэтому накоплены значительный опыт проведения оценки и информационная база, позволяющая глубоко изучать проблему. В работах, посвященных оценке программ и проектов в общественном секторе экономики развивающихся стран (к которым относится и РФ), проблеме корректного расчета социальной ставки дисконтирования внимания не уделялось. В отличие от развитых стран, в развивающихся странах отсутствуют официально рекомендованные социальные ставки дисконтирования для применения при оценке проектов в общественном секторе. Например, для

Великобритании рекомендованное значение ставки дисконтирования опубликовано в руководстве «Зеленая книга» (Green Book), которое на 2003 г. составляло 3,5% в реальном выражении. Таким образом, существующие оценки социальной ставки для развивающихся стран отражают позицию исследователей, занимающихся данной проблемой, а не рекомендованные правительством значения.

На сегодняшний день в российских научных статьях проблема оценки социальной ставки дисконтирования в проектах общественного сектора рассмотрена неполно. В статье В.М. Архипова, А.М. Емельянова, М.А. Шелунцовой [1] помещены значения ставки дисконтирования для регионов России, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения социальной ставки дисконтирования для регионов России [1]

Значение <i>SRTP</i> , %	Регион России
2,5	г. Москва
2,8	Республика Ингушетия
2,9	Республика Дагестан, Кабардино-Балкарская Республика
3,0	Карачаево-Черкесская Республика; Самарская область
3,1	Новосибирская область; Ставропольский и Краснодарский края
3,2	Белгородская область
3,3	Республика Башкортостан
3,4	Московская и Калининградская области; Республика Татарстан; г. Санкт-Петербург; Приморский край
3,5	Алтайский край; Ростовская и Липецкая области; республики Коми и Северная Осетия – Алания
3,6	Удмуртская и Чувашская Республики; Республики Адыгея и Бурятия; Омская, Ульяновская, Томская и Волгоградская области; Красноярский край; Еврейская автономная область
3,7	Амурская, Свердловская, Кировская и Астраханская области; республики Марий Эл и Саха (Якутия); Пермский край
3,8	Саратовская и Калужская области
3,9	Хабаровский и Забайкальский края; Тюменская, Вологодская, Орловская и Челябинская области; Республика Алтай
4,0	Иркутская, Пензенская, Ленинградская, Архангельская и Нижегородская области
4,1	Рязанская и Оренбургская области; Республика Мордовия
4,2	Смоленская, Мурманская, Ивановская, Сахалинская и Воронежская области; республики Хакасия и Тыва
4,3	Камчатский край; Брянская, Костромская, Псковская, Тамбовская и Кемеровская области
4,4	Тверская, Курганская и Курская области
4,5	Владимирская область
4,6	Новгородская и Ярославская области; Республика Карелия
5,0	Тульская область
5,1	Чукотский автономный округ; Республика Калмыкия
5,8	Магаданская область

2.2.4 Основы современной демографии и теории выживаемости

Пусть D случайная величина, обозначающая момент (возраст) смерти, то есть время до наступления смерти человека (остаточное время жизни) и $f(t), F(t) = P\{D < t\}$ –

функция плотности вероятности и интегральная функция распределения СВ D соответственно.

Так как СВ D имеет верхний предел D_m – максимальный возраст, до которого доживают люди в мире (или максимальный возраст рассматриваемой когорты (в регионе, отрасли, компании), то функция плотности вероятности (ФПВ) и интегральная функция распределения (ИФР) удовлетворяют следующим условиям:

$$f(D) \geq 0, \forall D \geq 0, F(D_m) = \int_0^{D_m} f(t) dt = 1. \quad (2.2.11)$$

Yaari в своей работе [2] ввел понятие приведенной (дисконтированной) полезности продолжительности жизни, *при условии ее неопределенности*. Так как время смерти D является случайным, то и полезность продолжительности жизни индивидуума также является случайной величиной. В этом случае средняя ожидаемая дисконтированная полезность остаточной продолжительности жизни в возрасте x имеет вид [2]

$$L(x) = E[U(x)] = \int_x^{D_m} f(t) U(x, t) dt. \quad (2.2.12)$$

Этот подход широко используется в экономике для определения моделей потребления и оптимального страхового покрытия.

Функцией выживаемости (survival function) человека является функция вида

$$S(t) = P\{T > t\} = 1 - F(t) = \int_t^{+\infty} f(u) du. \quad (2.2.13)$$

Вероятность $P\{T > t\}$ означает вероятность смерти в заданном временном интервале t . То есть, функция выживаемости описывает условную вероятность смерти *некоторое время спустя* момента t .

Обычно предполагается, что $S(0) = 1$, хотя это значение может быть и меньше, чем 1, если есть возможность немедленной смерти.

Интегральная функция распределения (ИФР) имеет вид

$$F(t) = P\{T < t\} = 1 - S(t), \quad (2.2.14)$$

и описывает вероятность того, что смерть наступила к моменту времени t .

Рассмотрим функцию риска (hazard function) – мгновенную интенсивность осуществления смерти:

$$\lambda(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P\{t \leq T < t + dt\}}{dt \cdot S(t)} = \frac{f(t)}{S(t)}. \quad (2.2.15)$$

Это функция плотности вероятности распределения смертности. Заметим, что $f(t) = -S'(t)$. Тогда

$$\lambda(t) = -\frac{d}{dt} \ln S(t). \quad (2.2.16)$$

Следовательно,

$$S(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(u) du\right). \quad (2.2.17)$$

В демографии и актуарных расчетах интенсивность (сила) смертности является синонимом функции риска.

Остаточное время жизни в возрасте x – это время, оставшееся до смерти, при условии дожития до возраста x , то есть время $T - x$. Вероятность смерти в возрасте $t > x$, при условии дожития до возраста x описывается уравнением

$$P\{T \leq t | T > x\} = \frac{P\{x < T \leq t\}}{P\{T > x\}} = \frac{F(t) - F(x)}{S(x)}. \quad (2.2.18)$$

Тогда ФПВ остаточного времени жизни

$$\frac{d}{dt} \frac{F(t) - F(x)}{S(x)} = \frac{f(t)}{S(x)}. \quad (2.2.19)$$

При этом среднее ожидаемое остаточное время жизни $e(x)$ в возрасте x :

$$e(x) = \frac{1}{S(x)} \int_0^{D_m} t f(x+t) dt = \frac{1}{S(x)} \int_x^{D_m} t f(t) dt = \frac{1}{S(x)} \int_x^{D_m} S(t) dt, \quad (2.2.20)$$

где последнее выражение получено интегрированием по частям.

При $x = 0$ формула (2.2.20) дает СОПЖ при рождении:

$$e(0) = \int_0^{D_m} S(t) dt.$$

Тогда среднюю ожидаемую дисконтируемую полезность остаточной продолжительности жизни в возрасте x (при условии дожития до этого возраста) можно вычислить по формуле

$$\begin{aligned} L(x) &= \frac{1}{S(x)} \int_x^{D_m} f(t) U(x, t) dt = \\ &= \frac{1}{S(x)} \int_x^{D_m} f(t) \int_x^t u(c_\tau) \exp \left[-\int_x^\tau \gamma(\theta) d\theta \right] d\tau dt. \end{aligned} \quad (2.2.21)$$

Учитывая, что $dS(t) = -f(t) dt$ и интегрируя выражение (2.2.21) по частям, получим

$$\begin{aligned} L(x) &= \frac{1}{S(x)} \int_x^{D_m} S(t) u(c_t) \exp \left[-\int_x^t \gamma(\theta) d\theta \right] dt = \\ &= \frac{1}{S(x)} \int_x^{D_m} S(t) u(c_t) \exp \left[-\int_x^t \rho(\theta) d\theta + \mu \delta(t-x) \right] dt \end{aligned} \quad (2.2.22)$$

В условиях совершенной конкуренции (идеального рынка), оптимальное потребление не зависит от времени t [4]. В этом случае формула (2.2.22) примет вид

$$\begin{aligned}
L(x) &= \frac{u(c)}{S(x)} \int_x^{D_m} S(t) \exp \left[-\int_x^t \rho(\theta) d\theta + \mu\delta(t-x) \right] dt \\
&= u(c) e_d(x, \rho, \mu, \delta),
\end{aligned}
\tag{2.2.23}$$

где

$e_d(x, \rho, \mu, \delta)$ – дисконтированная СОПЖ в возрасте x :

$$\begin{aligned}
e_d(x, \rho, \mu, \delta) &= \frac{1}{S(x)} \int_x^{D_m} S(t) \exp \left[-\int_x^t \rho(\tau) d\tau + \mu\delta(t-x) \right] dt = \\
&= \frac{1}{S(x)} \int_x^{D_m} \exp \left[-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau - \int_x^t \rho(\tau) d\tau + \mu\delta(t-x) \right] dt = \\
&= \frac{1}{S(x)} \int_x^{D_m} \exp \left[-\int_0^x \lambda(\tau) d\tau - \int_x^t [\lambda(\tau) + \rho(\tau)] d\tau + \mu\delta(t-x) \right] dt = \\
&= \int_x^{D_m} \exp \left[-\int_x^t [\lambda(\tau) + \rho(\tau)] d\tau + \mu\delta(t-x) \right] dt.
\end{aligned}
\tag{2.2.24}$$

При постоянном дисконтировании функция $L(x)$ – монотонно убывающая функция. Это подтверждается многими теоретическими и эмпирическими исследованиями. При дисконтировании, зависящем от времени, функция $L(x)$ возрастает до возраста около 25 лет, а затем уменьшается [5].

2.2.5 Закон смертности Гомперца-Мейкхема

Изложим одну из самых первых математических моделей зависимости смертности от возраста, которая была создана Б. Гомперцем в 1825 г., специалистом по страхованию жизни [16]:

$$\lambda(x) = -\frac{dl(x)}{l(x)dx} = \beta e^{\alpha x},
\tag{2.2.25}$$

где

$\lambda(x)$ — интенсивность смертности в возрасте x ,

$l(x)$ — число доживающих до возраста x ,

β и α — параметры модели.

Формула (2.2.25) называется законом Гомперца и применяется, как правило, при описании смертности людей старше 20 лет. Впоследствии этот закон стал широко использоваться и для описания смертности лабораторных животных.

Гомперц предположил, что скорость уменьшения жизнеспособности во времени снижается пропорционально ей самой. Для смертности (величины, обратной жизнеспособности) такое предположение соответствует экспоненциальному нарастанию с возрастом. Поскольку интенсивность смертности служит мерой человеческой подверженности смерти, Гомперц принял в качестве меры сопротивляемости обратной ей величину $\frac{1}{\lambda(x)}$, получив уравнение [17]

$$\frac{d}{dx} \frac{1}{\lambda(x)} = -\alpha \frac{1}{\lambda(x)}, \quad (2.2.26)$$

где

α — неотрицательный параметр.

После интегрирования и упрощения уравнения (2.2.26) получается формула (2.2.25).

Гомперц предполагал, что наряду со смертностью, экспоненциально растущей с возрастом, существует компонента смертности, не зависящая от возраста, то есть смерть является следствием двух причин [17]: 1) случайная – без предшествующей предрасположенности к смерти или физическому износу, 2) износ или повышенная неспособность противостоять разрушению.

Иначе говоря, наряду с экспоненциально растущей компонентой смертности, обусловленной старением, должна существовать не зависящая от возраста компонента, связанная с экстремальными ситуациями.

Однако при анализе Гомперц рассмотрел лишь экспоненциальную составляющую смертности.

В 1860 г. другой специалист по страхованию жизни — У. Мейкхем добавил в формулу Гомперца не зависящее от возраста слагаемое [18], которое получило название параметра Мейкхема. Таким образом, появился закон Гомперца-Мейкхема (Г-М):

$$\lambda(x, \alpha, \beta, \gamma) = M + \beta e^{\alpha x}, \quad (2.2.27)$$

где

M – коэффициент Мейкхема, характеризующий вклад в смертность воздействий, эффект от которых не зависит от возраста (случайная смертность).

Также Гомперц отмечал сходство кривых изменения смертности и энтропии, а В. Перкс (1932) прямо писал [19], что «неспособность противостоять разрушению имеет ту же природу, что и рассеяние энергии» (то есть, старение эквивалентно увеличению энтропии, подтверждение этому приведено ниже).

2.2.6 Оценка параметров закона

Согласно [17], способ определения параметров формулы Г-М состоит в использовании стандартных программ для оценки параметров нелинейной регрессии. Одна из таких программ имеется в известном пакете BMDP, а другая была составлена В.Н. Носовым (биологический факультет МГУ) в работе [17], где реализован метод, позволяющий рассчитывать оценки параметров закона Гомперца-Мейкема на основании чисел доживающих в четырех равноотстоящих возрастах (например, в возрастах 20, 40, 60 и 80 лет).

Пусть $l_{x_0}, l_{x_0+\Delta x}, l_{x_0+2\Delta x}, l_{x_0+3\Delta x}$ — числа доживающих до соответствующего возраста в анализируемой таблице смертности. Для определения искомых параметров сначала рассчитываются следующие вспомогательные величины [17]:

$$\begin{aligned} y_1 &= \ln\left(\frac{l_{x_0}}{l_{x_0+\Delta x}}\right); \quad y_2 = \ln\left(\frac{l_{x_0+\Delta x}}{l_{x_0+2\Delta x}}\right); \quad y_3 = \ln\left(\frac{l_{x_0+2\Delta x}}{l_{x_0+3\Delta x}}\right); \\ z &= y_1 + y_3 - 2y_2; \\ r &= \frac{y_3 - y_2}{y_2 - y_1}. \end{aligned} \tag{2.2.28}$$

Тогда параметры уравнения Г-М вычисляются по формулам [17]:

$$M = \frac{y_1 y_3 - y_2^2}{z \Delta x}, \quad \beta = \frac{(y_2 - y_1)^2 \ln r}{z \Delta x (r - 1) r^{\frac{x_0}{\Delta x}}}, \quad \alpha = \frac{1}{\Delta x} \ln r. \tag{2.2.29}$$

Наибольшая точность оценки параметров уравнения Гомперц-Мейкхема с помощью данного четырехточечного алгоритма достигается в случае, если $x_0 = \Delta x = 20$ лет, поскольку в возрастном диапазоне от 20 до 80 лет уравнение Г-М описывает смертность гораздо лучше, чем вне этого диапазона [18].

2.2.7 Оценка остаточного времени жизни

Можно показать, что функция выживания в случае закона Г-М будет иметь следующий вид

$$S(x, M, \beta, \alpha) = \exp\left(-Mx + \frac{\beta}{\alpha}(e^{\alpha x} - 1)\right). \quad (2.2.30)$$

Тогда, согласно [24], СОПЖ при рождении будет определяться через неполную гамму-функцию

$$\begin{aligned} e_0(M, \beta, \alpha) &= \int_0^{\infty} S(t; M, \beta, \alpha) dt = \int_0^{\infty} \exp\left(-Mt - \frac{\beta}{\alpha}(e^{\alpha t} - 1)\right) dt = \\ &= \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{M/\alpha} \frac{e^{\beta/\alpha}}{\alpha} \Gamma\left(-\frac{M}{\alpha}, \frac{\beta}{\alpha}\right), \end{aligned} \quad (2.2.31)$$

где

$$\Gamma(a, c) = \int_c^{\infty} e^{-t} t^{(a-1)} dt \quad \text{– неполная гамма-функция.}$$

Используя формулу (2.2.20), получим, что математическое ожидание остаточного времени жизни человека возраста x , называемое полной ожидаемой продолжительностью жизни, можно оценить по формуле

$$\begin{aligned} e_x(M, \beta, \alpha) &= \int_0^{\infty} \frac{S(x+t; M, \beta, \alpha)}{S(x; M, \beta, \alpha)} dt = \\ &= \int_0^{\infty} \exp\left(-Mt - \frac{\beta}{\alpha}e^{\alpha x}(e^{\alpha t} - 1)\right) dt. \end{aligned} \quad (2.2.32)$$

Теорема 1.

$$e_x(M, \beta, \alpha) = e_0(M, \beta e^{\alpha x}, \alpha). \quad (2.2.33)$$

Теорему 1 легко доказать, если сравнить формулы (2.2.31) и (2.2.32). Подробное доказательство теоремы приведено в [25].

2.2.8 Таблицы смертности/дожития

В данной работе будут использоваться таблицы дожития/смертности.

Для наиболее полной оценки естественного движения и воспроизводства населения в статистике используют таблицы смертности. Примером такой является таблица 2.2.

Таблица 2.2 – Структура таблицы смертности населения

Возраст, лет	Число доживших до возраста x , лет	Число умирающих в возрасте от x до $x + 1$	Вероятность дожить до следующего возраста	Вероятность смерти в течение года	Число живущих в возрасте x	Предстоящее число чел.-лет жизни	Средняя продолжительность предстоящей жизни	Коэффициент дожития
x	l_x	d_x	p_x	q_x	L_x	T_x	e_x	P_x

Смысл таблиц смертности (дожития) заключается в том, что они показывают, как происходит постепенное вымирание какого-то исходного поколения новорожденных. Обычно это исходное поколение (когорты) принимается за круглую величину l_0 (часто это 100 000). Эта величина показывает, что речь идет о новорожденных, которым нет одного года.

Показатели таблицы и их общепринятые обозначения:

x – возраст (от 0 до 100 лет; встречаются и другие верхние границы, например, 80 или 85 лет),

l_x – точное число доживающих до возраста x лет (l_0 – размер когорты),

$d_x = l_x - l_{x+1}$ – число умирающих при переходе от возраста x к возрасту $x + 1$ лет,

$q_x = d_x / l_x$ – вероятность умереть при переходе от возраста x к возрасту $x + 1$ лет,

$p_x = 1 - q_x$ – вероятность дожития до возраста $x + 1$ лет для лиц в точном возрасте x лет,

L_x – среднее число живущих в возрасте x (с точки зрения демографии это число человеко-лет, прожитых поколением в возрасте x), обычно рассчитывается как среднее арифметическое между l_x и l_{x+1} для всех возрастов, кроме 0 (L_0 рассчитывается по особой формуле ввиду крайней неравномерности распределения младенческой смертности).
 $L_x = (l_x + l_{x+1}) / 2$.

T_x – число человеко-лет, которое предстоит прожить *совокупности* людей, находящихся в возрасте x лет $T_x = L_x + L_{x+1} + \dots + L_n$ (сумма L_x от возраста x до верхнего возрастного предела таблицы);

$e_x = T_x / l_x$ – средняя ожидаемая продолжительность предстоящей жизни (СОПЖ) в возрасте x лет. СОПЖ – это число лет, которое в среднем предстоит прожить индивидам данного возраста, если на протяжении всей их жизни, до полного вымирания поколения, сохранится данный режим смертности, то есть повозрастные коэффициенты смертности останутся неизменными. Снижение или рост СОПЖ обуславливается динамикой смертности во всех возрастных группах населения;

$P_x = L_{x+1} / L_x$ коэффициент передвижки – вероятность для индивидуума прожить один год в интервале возраста от x до $x + 1$ и попасть в интервал от $x + 1$ до $x + 2$.

Числа l_x показывают, сколько лиц из исходной совокупности новорожденных доживают до каждого следующего возраста (года).

Если взять последовательные разности этих чисел, т.е. $l_0 - l_1, l_1 - l_2, \dots, l_x - l_{x+1}$, то эти разности покажут количество лиц, умерших в возрасте x лет, т.е. дадут d_x .

В сумме вся численность умерших во всех возрастах будет равна L_0 :

$$d_0 + d_1 + d_2 + \dots + d_n = l_0. \quad (2.2.34)$$

Эта связь показателей позволяет утверждать и обратное: численность лиц, доживающих до $x + 1$ года и численность умерших в возрасте x должны равняться числу лиц, доживших до x лет:

$$l_{x+1} + d_x = l_x. \quad (2.2.35)$$

Разделим почленно это равенство на l_x , тогда

$$(l_{x+1} / l_x) + (d_x / l_x) = 1, \quad (2.2.36)$$

где

$p_x = l_{x+1}/l_x$ – вероятность выжить в возрасте x и дожить до $x + 1$ года,

$q_x = d_x/l_x$ – вероятность умереть в возрасте x , не дожив до $x + 1$ года.

Таблицы смертности строят на основе годовых возрастных коэффициентов смертности, которые измеряют уровень смертности в год по отдельным возрастным категориям и представляют собой процентное соотношение числа умерших за год в заданном возрасте.

Рассмотрим построение таблицы дожития (смертности) на основе возрастных коэффициентов смертности m_x и известных значений l_0 и L_0 .

На основе возрастных коэффициентов смертности определим вероятность смерти q_x в течение года для каждого года жизни:

$$q_x = \frac{m_x}{100}. \quad (2.2.37)$$

Далее определим вероятность дожития p_x от возраста x до возраста $x + 1$:

$$p_x = 1 - q_x. \quad (2.2.38)$$

Теперь рассчитаем число доживающих l_x до возраста x . l_0 известно по условию. Тогда

$$l_x = l_{x-1}p_{x-1}, \quad x = 1, \dots, n, \quad (2.2.39)$$

где

n – максимальный возраст когорты рассматриваемой таблицы смертности.

При известном L_0 найдем число живущих L_x в возрасте x лет, представляющее собой среднее арифметическое из числа доживающих до возраста x и до возраста $x + 1$:

$$L_x = \frac{l_x + l_{x+1}}{2}, \quad x = 1, 2, \dots, n. \quad (2.2.40)$$

Определим число предстоящих человеко-лет жизни T_x для разных возрастов.

$T_0 = \sum_{x=0}^n L_x$. Тогда

$$T_x = T_{x-1} - L_{x-1}, \quad x = 1, 2, \dots, n. \quad (2.2.41)$$

Рассчитаем среднюю продолжительность предстоящей жизни e_x населения по формуле

$$e_x = \frac{T_x}{l_x}. \quad (2.2.42)$$

Следует отметить, что использование готовых таблиц смертности для учета влияния на СОПЖ гибели людей невозможно в силу погрешностей округления и накопления ошибок. Поэтому невозможно учесть влияние гибели одного человека, когда из-за ошибок округления, происходит потеря нескольких человек. Рекомендуется, на основе годовых возрастных коэффициентов смертности и параметров l_0, L_0 , и имеющейся таблицы смертности заново построить таблицу смертности при этом, не производя никаких промежуточных округлений. Далее на основе полученной таблицы оценить влияние на СОПЖ внезапной гибели людей.

2.3 Индекс качества жизни (life quality index)

Для дальнейшего использования формулы (2.2.23) необходимо определить подходящую функцию потребления $u(c)$. В рассматриваемом контексте задача сводится к вопросу: скольким нужно пожертвовать из полезности потребления и других аспектов качества жизни, чтобы взамен получить некоторое увеличение продолжительности жизни за счет затрат на уменьшение риска? Доход создается работой, и чем продолжительней работа, тем больше доход, но тем меньше время на досуг/отдых (здесь и ниже рассматривается проблема на национальном/региональном уровне). Доход пропорционален производительности труда (объем продукции в денежном выражении в единицу времени). Индивидуум может увеличить время досуга либо за счет увеличения продолжительности своей жизни путем уменьшения риска, либо за счет уменьшения времени, затрачиваемого им на экономическое производство, что ведет, в общем случае, к меньшему доходу. Nathwani и др. [6] использовали гипотезу: «в среднем люди работают ровно столько, чтобы маргинальная стоимость их богатства/благосостояния или дохода, который они получают за свою работу, равнялась маргинальной цене того времени, которое они потратили на эту работу» (принцип оптимизации «работа-досуг/отдых») и определили меру качества жизни как

$$L = f(g)h(t), \quad (2.3.1)$$

где

g – потребление (ежегодный доход),

$e(0)$ – СОПЖ при рождении,

$t = (1-w)e(0)$ – время досуга/отдыха,

w ($0 < w < 1$) – доля ожидаемой продолжительности жизни, потраченной на (оплачиваемую) работу,

$f(g)$ и $h(t)$ – две пока неизвестных функции этих качеств.

Величина L названа *индексом качества жизни* (ИКЖ) [6]. Таким образом, ИКЖ является произведением функции $f(g)$, измеряющей качество жизни и функции $h(t)$, измеряющей ее продолжительность.

Предполагается, что любое изменение СОПЖ должно быть компенсировано соответствующим изменением g , то есть любые инвестиции (сокращение потребления на dg) в улучшение (сохранение) жизни должны быть компенсированы выигрышем de в

СОПЖ (и наоборот), так чтобы L оставалось неизменным. Формально это означает, что полный дифференциал функции L равен нулю и из этого следует, что

$$dL = \frac{\partial L}{\partial g} dg + \frac{\partial L}{\partial e} de = 0 \Rightarrow \frac{dg}{de} = -\frac{\frac{\partial L}{\partial e}}{\frac{\partial L}{\partial g}}. \quad (2.3.2)$$

Пусть $f(g)$ и $h(t)$ монотонно возрастающие, положительные функции. Тогда

$$dL = \frac{df(g)}{dg} h(t) dg + f(g) \frac{dh(t)}{dt} dt. \quad (2.3.3)$$

В этом случае относительное изменение (динамика) ИКЖ

$$\frac{dL}{L} = \frac{g}{f(g)} \frac{df(g)}{dg} \frac{dg}{g} + \frac{t}{h(t)} \frac{dh(t)}{dt} \frac{dt}{t} = k_g \frac{dg}{g} + k_t \frac{dt}{t}, \quad (2.3.4)$$

Для того, чтобы ИКЖ был универсальным показателем, dL/L не должно зависеть от абсолютных значений g и e . Nathwani и др. рассматривают величины k_g, k_t как константы,

в частности $\frac{k_g}{k_t} = const$. В этом случае имеем два дифференциальных уравнения:

$$\begin{aligned} k_g &= \frac{g}{f(g)} \frac{df(g)}{dg} = c_1, \\ k_t &= \frac{t}{h(t)} \frac{dh(t)}{dt} = c_2 \end{aligned} \quad (2.3.5)$$

и соответствующие решения:

$$\begin{aligned} f(g) &= g^{c_1}, \\ h(t) &= t^{c_2}. \end{aligned} \quad (2.3.6)$$

Тогда ИКЖ принимает следующий вид

$$L = g^{c_1} [(1-w)e(0)]^{c_2}. \quad (2.3.7)$$

Используя принцип оптимизации «работа-досуг/отдых», приведенный выше, получим, что g пропорционально времени, затрачиваемого на работу, то есть $g \propto pw$, где $c = pw$ – годовая скорость потребления (доход), p – производительность труда (денежная производительность за час работы). Другие факторы, влияющие на доход (капитал, земля и другие ресурсы) должны учитываться через коэффициент пропорциональности. Большая часть работ грязная, скучная, тяжелая и иногда опасная. Здесь подразумевается работа, необходимая для поднятия уровня потребления (доходов) g , а не работа, выполненная дополнительно для удовольствия. Время работы (включая время в пути), не доступно для жизни в свое удовольствие (это может измениться, когда появится транспорт, управляемый роботами). Тогда разумно предположить, что среднестатистический индивидуум максимизирует свой ИКЖ по величине w . В максимуме это

$$\frac{dL}{dw} = \frac{d}{dw} \left((pw)^{c_1} [(1-w)e(0)]^{c_2} \right) = 0, \quad (2.3.8)$$

Откуда

$$c_1 = c_2 \frac{w}{1-w}.$$

Пусть $c_1 + c_2 = \tilde{c}$, тогда $c_1 = \tilde{c}w$, $c_2 = \tilde{c}(1-w)$ и, следовательно,

$$L = (pw)^{\tilde{c}w} (1-w)^{\tilde{c}(1-w)} e(0)^{\tilde{c}(1-w)} \quad (2.3.9)$$

Без потери общности, считаем, что $\tilde{c} = 1$, тогда

$$L = (pw)^w (1-w)^{(1-w)} e(0)^{(1-w)}. \quad (2.3.10)$$

Деление этого выражения на w снимает некоторую несогласованность, поскольку индивидуумы с одинаковыми c и $e(0)$, но с большим w будут иметь более высокое качество жизни. Тогда имеем

$$L = \frac{c^w}{w} (1-w)^{(1-w)} e(0)^{(1-w)}. \quad (2.3.11)$$

Извлекая корень степени $(1-w)$ и деля результат на $q = w / (1-w)$, получим [5, 9]

$$L = \frac{c^q}{q} e(0)(1-w). \quad (2.3.12)$$

Фактор $(1-w)$ рассматривается как константа и в дальнейшем опускается, что приводит к следующему результату:

$$L = \frac{c^q}{q} e(0). \quad (2.3.13)$$

Таким образом, функция потребления

$$u(c) = \frac{c^q}{q}, \quad (2.3.14)$$

что соответствует изоэластичной степенной функции (1.2.3) при $q = 1 - \mu$.

В экономике принято, что малое значение q подразумевает, что большее значение полезности жизни достигается в основном за счет увеличения продолжительности жизни, в то время как высокое значение q подразумевает, что эта полезность жизни достигнута в основном за счет потребления.

В качестве величины c , Nathwani и др. рассматривают ВВП на душу населения (с учетом паритета покупательской способности, при необходимости), который является показателем производительности общества. Тогда формула (2.3.13) примет следующий вид

$$L = u(g) e(0) = \frac{g^q}{q} e(0), \quad (2.3.15)$$

где

g – ВВП на душу населения.

Сравнивая уравнение (2.3.15) с уравнением (2.2.23) видно, что последнее не что иное, как *полезность жизни без дисконтирования при детерминированной продолжительности жизни, равной СОПЖ при рождении*.

Таким образом, ИКЖ представляет собой комплексный социальный индикатор как функцию двух социальных показателей: ВВП на душу населения (с учетом паритета покупательской способности при необходимости) и СОПЖ в добром здравии. Предполагается, что оба этих показателя независимы, что может и не соблюдаться. Однако экономисты поддерживают идею независимости. Например, они показали, что рост ВВП и СОПЖ исторически развивались совершенно независимо, причем на последнюю в основном влияют успехи в области медицины (превентивные и терапевтические методы), которые лишь слабо или косвенно связаны с ВВП [8].

Если в формуле (2.3.15) величину СОПЖ при рождении $e(0)$ заменить на дисконтируемую СОПЖ в возрасте x :

$$L = LQI = u(g) e_d(x, \rho, \mu, \delta) = \frac{g^q}{q} e_d(x, \rho, \mu, \delta) \quad (2.3.16)$$

то полученный ИКЖ можно интерпретировать как *дисконтируемую полезность остаточной продолжительности жизни*. Тогда согласно Эрроу–Пратта (Arrow-Pratt), функция потребления из (2.3.16) будет принадлежать классу так называемых функций *неприятия риска с коэффициентом q относительного неприятия риска*.

Для того чтобы описывать предпочтения индивидуумов в условиях неопределенности, необходимо измерять (не)склонность к риску. Отношение к риску – понятие в экономике, финансах и в психологии, характеризующее склонность потребителей и инвесторов к принятию того или иного решения в условиях риска. О неприятии риска говорят, когда инвестор предпочитает определенный результат неопределенному результату с тем же средним доходом.

Согласно экономической теории неприятия риска, относительная мера неприятия риска Эрроу–Пратта (coefficient of relative risk aversion – CRRA) вычисляется по формуле

$$R(c_\tau) = -\frac{u''(c_\tau)}{u'(c_\tau)} c_\tau. \quad (2.3.17)$$

Таким образом, для функции полезности (2.2.5) она равна эластичности предельной полезности по объему потребления μ (см. формулу (2.2.6)).

Поясним происхождение коэффициента Эрроу-Пратта. Степень неприятия риска определяется вогнутостью функции полезности. Математически степень вогнутости определяется величиной второй производной. Однако одной второй производной недостаточно: если функцию полезности увеличить, например, в два раза, то система предпочтений ЛППР не изменится, но вторая производная тоже возрастает в два раза, хотя неприятие риска, очевидно, не изменилось. Для устранения этого вместо второй производной применяется ее отношение к первой производной.

Параметр μ является эластичностью предельного потребления и принимается независимым от времени. Коэффициент относительного неприятия риска для функции потребления равен q или $\mu = 1 - q$. Большое значение q указывает на неприятие риска и предпочтение большого потребления, и наоборот. Очевидно, что параметр w является важным для функции потребления. Для его оценки используется следующая формула [11]

$$w = \frac{n_w}{N} \cdot \frac{h_w}{24 \cdot 365} \cdot \frac{9}{8}, \quad (2.3.18)$$

где

n_w – численность населения, занятого в отраслях экономики,

N – численность всего (рассматриваемого) населения,

h_w – количество рабочих часов в год.

В формуле (2.3.18) предполагается 8-часовой рабочий день плюс время в пути на работу 1 час (коэффициент 9/8). Аналогичные рассуждения можно провести и в случае нелинейной связи между g и w , подробнее это описано в [12].

Предполагая около 1600 рабочих часов в год (включая 1 час на время в пути) в течение рабочего времени 45 лет, Nathwani и др. [6] оценили $w \approx \frac{1}{8} \approx 0.125$. Тогда $q \approx 0.14$ и $\mu \approx 0.86$, что соответствует или немного превышает эмпирические данные, основанные на других концепциях [9].

2.4 Стоимость статистической жизни и готовность платить

Shepard и Zeckhauser [4] определили «цену среднестатистической жизни (value of statistical life)» (ЦСЖ – VSL) в возрасте x путем деления уравнения (2.2.23) или (2.3.16) на маргинальную полезность $du(c)/dc = u'(c)$, что переводит его размерность строго в денежные единицы:

$$\begin{aligned} \text{VSL}(x) &= \frac{u(c)}{u'(c)} \int_x^{D_m} \exp \left[-\int_x^t [\lambda(\tau) + \rho(\tau)] d\tau + \mu\delta(t-x) \right] dt = \\ &= \frac{g}{q} e_d(x, \rho, \mu, \delta). \end{aligned} \quad (2.4.1)$$

Видно, что ЦСЖ уменьшается со временем из-за уменьшения $e_d(x, \rho, \mu, \delta)$. Вывести цену человеческой жизни из какого-нибудь принципа чрезвычайно противоречивое занятие. Денежное выражение жизни не существует – «цена жизни бесконечна и неизмерима» [10], если говорить об индивидууме. Здесь, однако, рассматривается цена статистической жизни, как некая формальная константа в выражении (2.4.1), как денежная величина, которая нужна для того, чтобы *уменьшить риск смертности на единицу*.

Согласно собранной статистике за последние сто лет [12] в среднем размер популяции растет со временем по экспоненте e^{nt} , $t > 0$, n скорость роста популяции (с учетом эффектов иммиграции и эмиграции). Для того, чтобы правильно учесть композицию населения, подвергающегося природным угрозам и технологическим авариям и катастрофам, как на территории потенциально опасного объекта (ПОО), так и в его окрестности, необходимо рассматриваемые величины осреднять по функции плотности вероятности (ФПВ) распределения возраста $h(x, n)$ рассматриваемого населения (сотрудников) как *стабильной популяции*. ФПВ распределения конкретной популяции можно получить также из таблиц дожития. Для стабильной популяции эта плотность имеет вид

$$h(x, n) = \frac{\exp[-nx]S(x)}{\int_0^{D_m} \exp[-nx]S(x)dx}, \quad (2.4.2)$$

У стабильной популяции смертность не меняется со временем. Популяция стабильна, когда $n \approx 0$. Тогда

$$h(x, n) \approx \frac{S(x)}{e(0)} \quad (2.4.3)$$

ФПВ распределения возраста конкретной популяции можно получить также из таблиц дожития. В этом случае параметр n определяется по формуле

$$n = K_b - K_m, \quad (2.4.4)$$

где

K_b, K_m – коэффициент рождаемости и смертности соответственно. Они определяются по таблицам дожития.

Тогда «социальная цена статистической жизни СЦСЖ – SVSL» определяется как

$$SVSL = \frac{g}{q} \bar{E}(\rho, \mu, \delta) \quad (2.4.5)$$

где

$\bar{E}(\rho, \mu, \delta)$ – дисконтированная осредненная по распределению возрастов $h(x, n)$ ожидаемая продолжительность жизни:

$$\bar{E}(\rho, \mu, \delta) = \int_0^{D_m} e_d(x, \rho, \mu, \delta) h(x, n) dx \quad (2.4.6)$$

Также можно оценить социальный ИКЖ (СИКЖ – SLQI) [9]:

$$SLQI = \frac{g^q}{q} \bar{E}(\rho, \mu, \delta). \quad (2.4.7)$$

Необходимо подчеркнуть, что СИКЖ, как и исходный ИКЖ, не является денежной величиной и имеет размерность «(руб.)^w(годы)» и интерпретируется как функция

полезности. Если его поделить на маргинальную полезность $u'(c)$ с целью превращения его в денежную величину, то он совпадает с уравнением (2.4.5).

Следует отметить, что коэффициент неприятия риска q должен использоваться только в контексте снижения риска. Он не имеет ничего общего с тем же параметром, который используется в экономике для описания межвременной эластичности замещения.

Готовность платить (ГП, willingness-to-pay – WTP) измеряет готовность человека пожертвовать одним желаемым атрибутом, богатством или потреблением, чтобы получить другой желаемый атрибут, в рассматриваемом случае, увеличить продолжительность жизни (улучшить выживаемость). Пусть de обозначает предельное изменение ожидаемой продолжительности жизни и dg предельное изменение потребления. Shepard/Zeckhauser и др. [4] ввели WTP, как инвариантность $L = L(x, g)$ относительно потери (прироста) потребления при увеличении (уменьшении) продолжительности жизни, что соответствует уравнению (2.3.2)

$$WTP = dg = - \frac{\frac{\partial L(x, g)}{\partial e(a)} de(x)}{\frac{\partial L(x, g)}{\partial g}} = - \frac{g}{q} \frac{de(x)}{e(x)}. \quad (2.4.8)$$

Для решений, касающихся инвестиций в безопасность жизнедеятельности, ИКЖ можно интерпретировать как двузначную функцию полезности для среднего члена общества. Предполагается, что решение с (маргинальным) влиянием на g и e (например, любые инвестиции, связанные с спасением жизни) выгодно для общества, если оно приводит к увеличению ИКЖ. Требование, чтобы полная производная от ИКЖ была равна или больше нуля ($dL \geq 0$), порождает критерий чистой выгоды (приемлемости инвестиций в проекты по снижению риска):

$$\frac{dg}{g} + \frac{1}{q} \frac{de(x)}{e(x)} \geq 0. \quad (2.4.9)$$

Неравенство (2.4.9) является критерием эффективности и доступности конкретных инвестиций в безопасность жизнедеятельности.

Равенство в (2.4.9) показывает какие мероприятия, сохраняющие человеческие жизни обществу, *необходимы и по средствам*; проекты с неравенством «<» неприемлемы. Такие проекты фактически будут опасны для жизни и находиться в конфликте с конституционным правом на жизнь. Каждый раз, когда малое увеличение СОПЖ за счет какого либо мероприятия, сохраняющего человеческие жизни (положительное de), ассоциируется с бо́льшими, чем оптимальными дополнительными затратами (отрицательное dg), необходимо искать другую альтернативу для инвестирования в проекты по спасению жизней (уменьшения риска). Если заданное положительное de осуществимо за меньшие средства, чем дает формула (2.4.9), то естественно, эта возможность должна быть реализована. Уравнение (2.4.9) легко поддается интерпретации. Например, для 1%-го увеличения СОПЖ годовые инвестиции размером примерно в 5% от g при $q = 0.2$ будут подъемными (приемлемыми). С практической точки зрения важно, чтобы все величины в уравнении (2.4.9) были легко доступными и могли быть в любой момент уточнены. Демократический принцип равенства диктует, что необходимо использовать средние величины g , e и w . Любые отклонения от средних значений для любой специфической группы людей должно быть тщательно обоснованы, если уравнение (2.4.9) применяется к проектам с недобровольными рисками. Важно отметить, что простой критерий (2.4.9) не зависит от любой выгоды, возникающей от применения мероприятия, сохраняющего человеческие жизни, кроме как от самого сохранения жизни, а также не зависит от какого либо дисконтирования.

Критерий (2.4.9) остается справедливым и для дисконтируемой полезности остаточной продолжительности жизни в возрасте x [уравнение (2.2.23)], зависящей от возраста:

$$\frac{dg}{g} + \frac{1}{q} \frac{de_d(x, \rho, \mu, \delta)}{e_d(x, \rho, \mu, \delta)} \geq 0. \quad (2.4.10)$$

и после осреднения по распределению возрастов $h(x, n)$ получается критерий оценки *социальной готовности платить* (СГП, SWTP):

$$\frac{dg}{g} + \frac{1}{q} \frac{d\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}{\bar{E}(\rho, \mu, \delta)} \geq 0 \quad \text{или} \quad dg \geq -\frac{g}{q} \frac{d\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}{\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}. \quad (2.4.11)$$

Преобразуя (2.4.9), выразим критерий эффективности с точки зрения порога для предельного изменения ВВП на душу населения, dg

$$-dg \leq \frac{g}{q} \frac{de(x)}{e(x)}. \quad (2.4.12)$$

В формуле (2.4.12) можно использовать осреднение по возрасту и дисконтирование, что осуществляется заменой $\frac{de(x)}{e(x)}$ на $\frac{d\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}{\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}$.

Формулу (2.4.12) можно использовать для оценки эффективности нормативных требований. Нормы должны требовать применение только эффективных мер безопасности, приводящих к снижению $-dg$ в ВВП на душу населения, которое меньше или равно порогу ИКЖ. Инвестиции в более дорогие меры безопасности приводят к перерасходу ограниченных социальных ресурсов, которые можно более эффективно инвестировать в другие сферы, тоже повышающие качество жизни социума. Однако эта же логика рассуждения применима и для противоположного случая: игнорирование мер безопасности, которые соответствуют критерию чистой выгоды ИКЖ (2.4.12), в условиях доступности эффективных мер для снижения риска, подразумевает ненужную потерю человеческих жизней.

Этот аргумент может быть использован, когда целью является определение количественных критериев приемлемости решений относительно инвестиций в безопасность жизнедеятельности, принимаемых отдельными лицами (например, владельцем объекта или сооружения). Критерий приемлемости решения для социального риска основан на требовании, чтобы все эффективные меры безопасности, оцененные по критерию чистой выгоды ИКЖ были реализованы. Это означает, что необходимо увеличить инвестиции в области безопасности (начиная с наиболее эффективных мер безопасности) до тех пор, пока предельное изменение удельного ВВП на душу населения $-dg$ не будет (как минимум) равным порогу ИКЖ. Таким образом, ЛПР по управлению риском для жизни на основе принципа предельных затрат на сохранение жизни, должно выполнить следующее условие для принятия социального риска:

$$-dg \geq \frac{g}{q} \frac{d\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}{\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}. \quad (2.4.13)$$

Более высокие значения для $-dg$ неэффективны с точки зрения сохранения жизни (т. е., приводят к бесполезным тратам средств) и поэтому не должны требоваться. Однако,

могут быть веские причины (возможно, не связанные с безопасностью жизни) таких неэффективных трат, если, например, чистая денежная оптимизация по критерию рентабельности («стоимость-выгода») требует более высоких инвестиций в безопасность, чем критерий ИКЖ. В уравнении (2.4.13) порог ИКЖ определяет минимальное требование, которое должно выполняться отдельными ЛПР, чтобы показать, что их решение приемлемо с социальной точки зрения. *Приемлемая область*, внутри которой отдельные ЛПР могут оптимизировать инвестиции на основе своих собственных предпочтений, *эквивалентна* неэффективной области для инвестиций в спасение жизни (т.е. $dL \leq 0$ в отличие от критерия чистой выгоды ИКЖ в уравнении (2.4.12), который получен из $dL \geq 0$). Это определение приемлемости основано на требовании, чтобы все доступные и эффективные меры по спасению жизни были реализованы на практике.

До сих пор порог ИКЖ определялся на основе предпочтений среднего гражданина (на душу населения). Для получения агрегированных (интегральных) совокупных значений, уравнение (2.4.13) следует умножить на размер популяции N_p . Это позволяет определить порог для предельных затрат на спасение жизни *на уровне проекта инфраструктуры*, dc :

$$dc = -dg \cdot N_p \geq SWTP = \frac{g}{q} \frac{d\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}{\bar{E}(\rho, \mu, \delta)} N_p. \quad (2.4.14)$$

Критерий приемлемости (2.4.14) основан на предельной стоимости dc для *предельного уменьшения риска dm* , а не на средних значениях.

Следует также отметить, что критерий (2.4.14) основан на годовых расходах и выгодах от спасения жизни. Если эти расходы и выгоды возникают в различные моменты времени, их надо дисконтировать (привести к единому срезу времени) для возможности адекватного сравнения.

2.5 Стоимость спасения жизни (life saving cost)

В целом, затраты, связанные с некоторым проектом по спасению жизни, могут быть легко определены. Однако задача оценки эффекта от него является более сложной. Оценка стоимости спасения жизни рассматривается с точки зрения прироста ожидаемой продолжительности жизни Δe . Стоимость такого проекта выражается в виде сокращения ВВП Δg . Эту *стоимость спасения жизни (ССЖ) или подразумеваемую стоимость предотвращения гибели человека (ICAF – implied cost of averting a fatality)* можно получить из равенства (2.4.9), после разделения переменных и интегрирования его g в пределах от g до $g + \Delta g$ и от e до $e + \Delta e$, т.е. стоимость $\Delta C = -\Delta g$ в год, чтобы продлить жизнь человека на Δe [15, 16]:

$$\Delta C = -\Delta g = g \left[1 - \left(1 + \frac{\Delta e}{e} \right)^{1-\frac{1}{w}} \right]. \quad (2.5.1)$$

Поскольку ΔC – годовая стоимость продления человеческой жизни на величину Δe и (недисконтированная) $ICAF$ тратится на инвестиции в проекты в точке принятия решения $t = 0$, то выражение (2.4.1) следует умножить на Δe :

$$ICAF = |\Delta g| \Delta e. \quad (2.5.2)$$

Значение ССЖ можно также использовать как величину возможной денежной компенсации родственникам жертв в случае аварии или катастрофы. Компенсация родственникам жертв покрывается или должна покрываться страхованием. Премия за это снижает выгоду предприятия. Поэтому имеет смысл рекомендовать общественности установить справедливую компенсацию родственникам погибших, примерно по величине ССЖ или ССЖ, умноженной на количество потерянных лет жизни e_r , т.е. [13, 14]:

$$ICAF(e_r) = g \left[1 - \left(1 + \frac{e_r}{e} \right)^{1-\frac{1}{w}} \right] e_r. \quad (2.5.3)$$

2.6 Влияние на среднюю ожидаемую продолжительность жизни внезапной гибели людей

Для использования формул п. 2.4, 2.5 необходимо оценить относительное изменение СОПЖ $\Delta e/e$ или e_r/e .

Внезапная гибель людей в результате аварии или катастрофы является случайным событием и изменяет режим смертности населения, проживающего в непосредственной близости (зона разрушения) критической инфраструктуры или ПОО. Население района, города, региона или страны принимается за исходную когорту, которая позволяет оценить относительный вклад аварии в увеличение интенсивности смертности и, соответственно, в уменьшение СОПЖ. Для оценки этого вклада используются *таблицы смертности/выживаемости*. Это позволяет сравнивать две таблицы смертности, составленные для одной и той же группы населения: одну до, а другую после аварии, и таким образом оценить величину увеличения $\Delta\lambda$ интенсивности смертности и величину снижения СОПЖ Δe .

2.6.1 Оценка влияния внезапной гибели людей на интенсивность смертности и относительное изменение СОПЖ с помощью закона Гомперца-Мейкхема

Для оценки *новой интенсивности смертности* $\lambda^*(x)$ с учетом гибели людей, необходимо по формулам (2.2.28), (2.2.29) оценить новые параметры α^*, β^*, M^* уравнения Гомперца-Мейкхема. Для этого нужно вычислить новые значения параметров $l_{x_0}^*, l_{x_0+\Delta x}^*, l_{x_0+2\Delta x}^*, l_{x_0+3\Delta x}^*$ таблицы смертности с учетом гибели людей.

При гибели одного человека в возрасте k полных лет (то есть дожил до возраста k лет, но не дожил до возраста $k+1$ лет), будем иметь

$$\begin{aligned} l_k^* &= l_k, \\ l_{k+i}^* &= l_{k+i} - 1, \quad i = 1, 2, \dots, n-k, \end{aligned} \tag{2.6.1}$$

где

n – максимальный возраст когорты рассматриваемой таблицы смертности.

В случае гибели N человек в возрасте k :

$$\begin{aligned}
 l_k^* &= l_k, \\
 l_{k+i}^* &= l_{k+i} - N, \quad i=1,2,\dots,n-k,
 \end{aligned}
 \tag{2.6.2}$$

Нетрудно доказать, что в случае гибели N человек в возрасте k_1, k_2, \dots, k_N полных лет (считаем, что $k_1 < k_2 < \dots < k_N$, в противном случае N человек можно перенумеровать в соответствии с этим условием):

для возрастов k_1, k_2, \dots, k_N :

$$\begin{aligned}
 l_{k_1}^* &= l_{k_1}, \\
 l_{k_2}^* &= l_{k_2} - 1, \\
 &\dots\dots\dots \\
 l_{k_N}^* &= l_{k_N} - (N - 1),
 \end{aligned}
 \tag{2.6.3}$$

для $(k_i + j)$ -ой строки таблицы смертности:

$$\begin{aligned}
 l_{k_i+j}^* &= l_{k_i+j} - i, \\
 i &= 1, 3, \dots, N - 1; \quad j = 1, 2, \dots, k_{i+1} - k_i.
 \end{aligned}
 \tag{2.6.4}$$

и наконец, для $(k_N + j)$ -ой строки таблицы смертности:

$$l_{k_N+j}^* = l_{k_N+j} - N, \quad j = 1, 2, \dots, n - k_N.
 \tag{2.6.5}$$

Таким образом, по формуле (2.2.27) вычисляя интенсивность смертности $\lambda^*(x)$ с учетом гибели людей, можно оценить величину изменения (приращение) интенсивности смертности:

$$\Delta(x) = \lambda(x) - \lambda^*(x).
 \tag{2.6.6}$$

Тогда новая вероятность выживания в возрасте x :

$$\begin{aligned}
S^*(x; M, \beta, \alpha) &= \exp\left(-\int_0^x (\lambda(t) + \Delta(t)) dt\right) = \\
&= S(x, M, \beta, \alpha) \exp\left(-\int_0^x \Delta(t) dt\right).
\end{aligned}
\tag{2.6.7}$$

Заметим, что *приращение интенсивности смертности в случае аварии или катастрофы не будет зависеть от возраста x* . Это следует из того, что интенсивность смертности будет изменяться только за счет коэффициента Мейкхема M , связанного с экстремальными ситуациями (случайная смерть) и не зависящим от возраста.

Таким образом, если для всех возрастов интенсивность смертности изменяется на величину, не зависящую от возраста, т.е. $\Delta(x) = \Delta$, то вероятность выживания равна

$$S^*(x; M, \beta, \alpha) = S(x; M, \beta, \alpha) e^{-\Delta x}.$$
(2.6.8)

То есть новая вероятность выживания равна старой вероятности умноженной на величину $e^{-\Delta x}$.

В этом случае новая СОПЖ в возрасте x будет вычисляться по формуле

$$e_x^*(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{\int_x^\infty S^*(t; M, \beta, \alpha) dt}{S^*(x; M, \beta, \alpha)} = \frac{\int_x^\infty S(t; M, \beta, \alpha) e^{-\Delta t} dt}{S(x; M, \beta, \alpha) e^{-\Delta x}}.$$
(2.6.9)

Обозначим $I(x) = \int_x^\infty S(t; M, \beta, \alpha) e^{-\Delta t} dt$.

Теорема 2. $I(x) = N(x) e_0(M + \Delta, \beta e^{\alpha x}, \alpha)$ или

$$I(x) = N(x) e_x(M + \Delta, \beta, \alpha), \text{ где } N(x) = S(x, M + \Delta, \beta, \alpha).$$

Доказательство теоремы 2 приведено в [25]. Из теоремы 2 видно, что приращение Δ изменяет только коэффициент Мейкхема M .

Таким образом, при изменении интенсивности смертности на величину Δ новая СОПЖ будет равна

$$e_x^*(M, \beta, \alpha) = \frac{S(x, M + \Delta, \beta, \alpha) e_x(M + \Delta, \beta, \alpha)}{S(x, M, \beta, \alpha) e^{-\Delta x}} \quad (2.6.10)$$

$$= e_x(M + \Delta, \beta, \alpha).$$

Следовательно, количество потерянных лет жизни в возрасте x :

$$e_r(x) = e_x(M, \beta, \alpha) - e_x(M + \Delta, \beta, \alpha), \quad (2.6.11)$$

и относительное изменение СОПЖ:

$$\frac{e_r(x)}{e(x)} = 1 - \frac{e_x(M + \Delta, \beta, \alpha)}{e_x(M, \beta, \alpha)}. \quad (2.6.12)$$

Тогда относительное изменение СОПЖ, осредненное по распределению возрастов $h(x, m)$:

$$E\left(\frac{e_r(x)}{e(x)}\right) = \int_0^{D_m} \frac{e_r(x)}{e(x)} h(x, m) dx. \quad (2.6.13)$$

где D_m – максимальный возраст в рассматриваемой таблице смертности.

Подставляя полученное значение в формулу (2.5.3) получим осредненную величину возможной денежной компенсации родственникам жертв в случае аварии или катастрофы.

2.6.2 Оценка влияния внезапной гибели людей на параметры таблиц смертности

Влияние гибели одного человека. Пусть человек погиб в возрасте k полных лет (то есть дожил до возраста k лет, но не дожил до возраста $k + 1$ лет). Тогда данные таблицы смертности изменятся следующим образом:

$$\begin{aligned}
l_k^* &= l_k, \\
d_k^* &= d_k + 1, \\
q_k^* &= \frac{d_k^*}{l_k^*} = q_k + \frac{1}{l_k}, \\
p_k^* &= 1 - q_k^* = p_k - \frac{1}{l_k}, \\
l_{k+1}^* &= l_k^* - d_k^* = l_{k+1} - 1, \\
L_k^* &= \frac{l_k^* + l_{k+1}^*}{2} = L_k - \frac{1}{2},
\end{aligned} \tag{2.6.14}$$

где символом «*» обозначены новые параметры таблицы смертности с учетом гибели одного человека.

Величину $\frac{1}{l_k}$ в данном случае можно интерпретировать как вероятность смерти одного человека при переходе от возраста k к возрасту $k + 1$ лет или как разницу между новой и базовой вероятностью умереть при переходе от возраста k к возрасту $k + 1$ лет, т.е.

$$\Delta q_k = q_k^* - q_k = \frac{1}{l_k}.$$

Так как $l_{k+1}^* = l_k^* - d_k^*$ и $d_{k+j}^* = d_{k+j}$, то $l_{k+j}^* = l_{k+j} - 1$ для любого $j = 1, 2, \dots, n - k$. Тогда для $(k + i)$ -й строки таблицы смертности будем иметь:

$$\begin{aligned}
l_{k+i}^* &= l_{k+i} - 1, \\
d_{k+i}^* &= d_{k+i}, \\
q_{k+i}^* &= \frac{d_{k+i}}{l_{k+i} - 1} = \frac{q_{k+i}}{1 - \frac{1}{l_{k+i}}}, \\
p_{k+i}^* &= \frac{l_{k+i+1}^*}{l_{k+i}^*} = \frac{l_{k+i+1} - 1}{l_{k+i} - 1} = \frac{1 - \frac{1}{l_{k+i+1}}}{1 - \frac{1}{l_{k+i}}} p_{k+i}, \\
L_{k+i}^* &= \frac{l_{k+i+1}^* + l_{k+i}^*}{2} = \frac{l_{k+i+1} + l_{k+i} - 2}{2} = L_{k+i} - 1, \\
i &= 1, 2, \dots, n - k.
\end{aligned} \tag{2.6.15}$$

Так как T_0 – число человеко-лет, которое предстоит прожить совокупности младенцев (исходная когорта), и оно вычисляется как сумма всех L_x (от нулевого возраста

до верхнего возрастного предела таблицы), то есть $T_0 = L_0 + L_1 + \dots + L_n$, то очевидно, что гибель одного человека любого возраста повлияет на число предстоящих человеко-лет жизни всей когорты (начиная с младенцев), следовательно и на СОПЖ, поэтому необходимо пересчитать число всех предстоящих человеко-лет жизни, начиная с T_0 :

$$\begin{aligned} T_0^* &= \sum_{x=0}^n L_x = \sum_{x=0}^{k-1} L_x + L_k - \frac{1}{2} + L_{k+1} - 1 + \dots + L_n - 1 = \\ &= T_0 - \left[\frac{1}{2} + (n-k) \right]. \end{aligned} \quad (2.6.16)$$

Легко показать, что для любого $i = 0, 1, \dots, k$ имеем

$$T_i^* = T_i - \left[\frac{1}{2} + (n-k) \right]. \quad (2.6.17)$$

Тогда при $i \leq k$

$$e_i^* = \frac{T_i^*}{l_i^*} = \frac{T_i - \left[\frac{1}{2} + (n-k) \right]}{l_i} = e_i - \frac{\frac{1}{2} + (n-k)}{l_i}, \quad i = 0, 1, \dots, k. \quad (2.6.18)$$

Таким образом, гибель одного человека в возрасте k уменьшает СОПЖ людей *от нулевого и до его возраста включительно* на величину, равную

$$\Delta e_i = \frac{\frac{1}{2} + (n-k)}{l_i}, \quad i = 0, 1, \dots, k. \quad (2.6.19)$$

Для СОПЖ людей возраста больше k получим

$$\begin{aligned} T_i^* &= L_i - 1 + L_{i+1} - 1 + \dots + L_n - 1 = T_i - (n-i+1), \\ i &= k+1, \dots, n. \end{aligned} \quad (2.6.20)$$

$$\begin{aligned}
e_i^* &= \frac{T_i^*}{l_i^*} = \frac{T_i - (n-i+1)}{l_i - 1} = \frac{T_i}{l_i \left(1 - \frac{1}{l_i}\right)} - \frac{(n-i+1)}{l_i \left(1 - \frac{1}{l_i}\right)} = \\
&= \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{l_i}\right)} \left[e_i - \frac{(n-i+1)}{l_i} \right], \quad i = k+1, \dots, n.
\end{aligned} \tag{2.6.21}$$

Величина

$$K_i = \frac{l_i}{l_i^*} = \frac{l_i}{l_i - 1} = \frac{1}{1 - \frac{1}{l_i}}. \tag{2.6.22}$$

является отношением числа доживающих до возраста i лет без гибели одного человека к числу доживающих до возраста i лет при условии гибели одного человека в возрасте k лет, то есть является коэффициентом пропорциональности.

Таким образом, СОПЖ людей возраста больше k с учетом гибели одного человека, получается путем уменьшения СОПЖ поколения этого возраста на величину, равную

$$\Delta e_i = \frac{(n-i+1)}{l_i}, \quad i = k+1, \dots, n, \tag{2.6.23}$$

и умножением полученного значения на коэффициент пропорциональности K :

$$e_i^* = K_i [e_i - \Delta e_i], \quad i = k+1, \dots, n. \tag{2.6.24}$$

Следует отметить, что скорректировать базовую таблицу смертности можно и без использования формул (2.6.14)–(2.6.24). Для этого необходимо по формулам (2.6.14), (2.6.15) вычислить новые значения следующих параметров:

$$\begin{aligned}
l_i^* &= l_i, \quad L_i^* = L_i, \quad i = 0, 1, \dots, k-1, \\
l_k^* &= l_k, \quad L_k^* = L_k - \frac{1}{2}, \\
l_{k+i}^* &= l_{k+i} - 1, \quad L_{k+i}^* = L_{k+i} - 1, \quad i = 1, 2, \dots, n-k,
\end{aligned}$$

и на основе этих значений вычислить остальные параметры по классическим формулам:

$$T_0^* = \sum_{x=0}^n L_x^*, \quad T_x^* = T_{x-1}^* - L_{x-1}^*, \quad x = 1, 2, \dots, n; \quad (2.6.25)$$

$$e_x^* = \frac{T_x^*}{l_x^*}, \quad x = 0, 1, \dots, n \quad (2.6.26)$$

Этот подход был использован для верификации значений СОПЖ, вычисленных по формулам (2.6.18) и (2.6.21).

Проанализируем величину уменьшения СОПЖ Δe_i из формулы (2.6.19). Анализ удобно начать с конца таблицы 2.3.

Таблица 2.3 – Величина Δe_i уменьшения СОПЖ в зависимости от возраста погибшего k и числа доживающих l_x до определенного возраста

l_x k	100 000	10 000	1 000	100	10
	Величина Δe_i , годы				
0	0.001005	0.01005	0.1005	1.005	10.05
20	0.000805	0.00805	0.0805	0.805	8.05
40	0.000605	0.00605	0.0605	0.605	6.05
60	0.000405	0.00405	0.0405	0.405	4.05
80	0.000205	0.00205	0.0205	0.205	2.05
100	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$

1) Пусть k – верхний возрастной предел таблицы, то есть $k = n$, тогда $\Delta e_i = \frac{1}{2l_i}$, $i = 0, 1, \dots, n$. Переменная l_x (число доживающих до возраста x) изменяется от размера когорты и вплоть до нескольких человек. Размер когорты также может быть разным: 100 000, 10 000, 1 000 и нескольких десятков человек (например, персонал ПОО). Очевидно, что $\Delta e_i = \frac{1}{2l_i} \rightarrow 0$ при $l_i \rightarrow \infty$, то есть чем больше значение l_x , тем меньше происходит влияние на СОПЖ, то есть гибель такого человека меньше всего уменьшает

СОПЖ младенцев и молодых людей и более влияет на старшее поколение. При $l_x = 100\ 000$ чел. $\Delta e_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ лет, при $l_x = 10\ 000$ чел. $\Delta e_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ лет, при $l_x = 1000$ чел. $\Delta e_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ лет, при $l_x = 100$ чел. $\Delta e_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ лет и при $l_x = 10$ чел. $\Delta e_0 = 5 \cdot 10^{-2}$ лет. Каждое последующее увеличение l_x в 10 раз уменьшает Δe_i в 10 раз. График функции Δe_i в зависимости от параметра l_x приведен на рисунке 2.2.

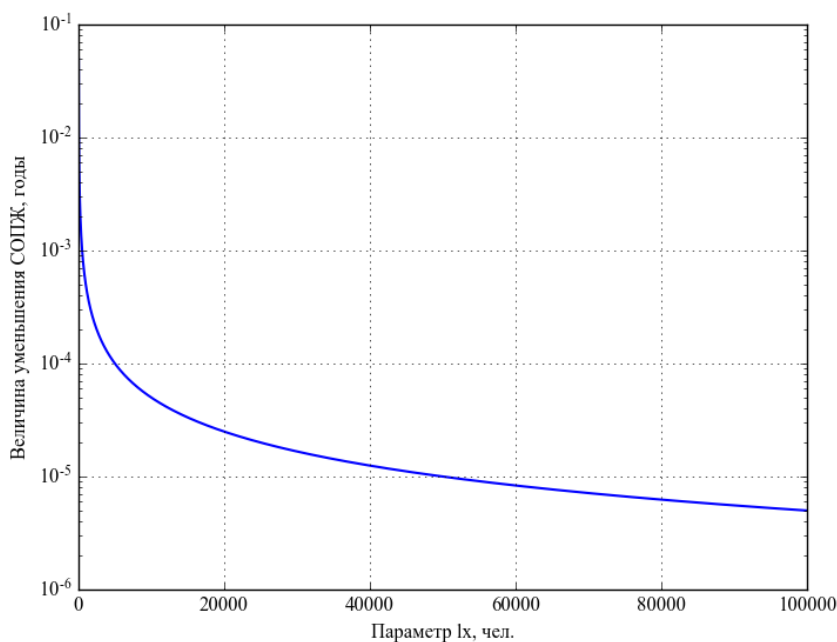


Рисунок 2.2 – График функции Δe_i в зависимости от числа l_x доживающих до возраста x

2) Проанализируем случай когда $k < n$. Из формулы (2.6.19) видно, что чем меньше k (возраст погибшего), тем числитель будет больше и тем больше значение Δe_i , то есть *чем меньше возраст погибшего, тем больше уменьшается СОПЖ людей младшего и одного с ним возраста*. Величина Δe_i для нескольких значений k и l_x приведена в таблице 2.3. График функции Δe_i приведен на рисунке 2.3.

При небольших размерах когорты число доживающих до определенного возраста l_x также будет небольшим. Таким образом, *чем меньше рассматриваемая совокупность людей, тем больше уменьшение их СОПЖ от гибели одного человека*.

3) Проанализируем величину уменьшения СОПЖ Δe_i из формулы (2.6.24).

Величина $K_i = \frac{l_i}{l_i^*} = \frac{l_i}{l_i - 1}$ при $l_i \in [10; 100000]$ изменяется в пределах от 1.111 до 1.000, то

есть увеличивается при уменьшении числа доживающих l_x до определенного возраста, или другими словами, увеличивается с возрастом.

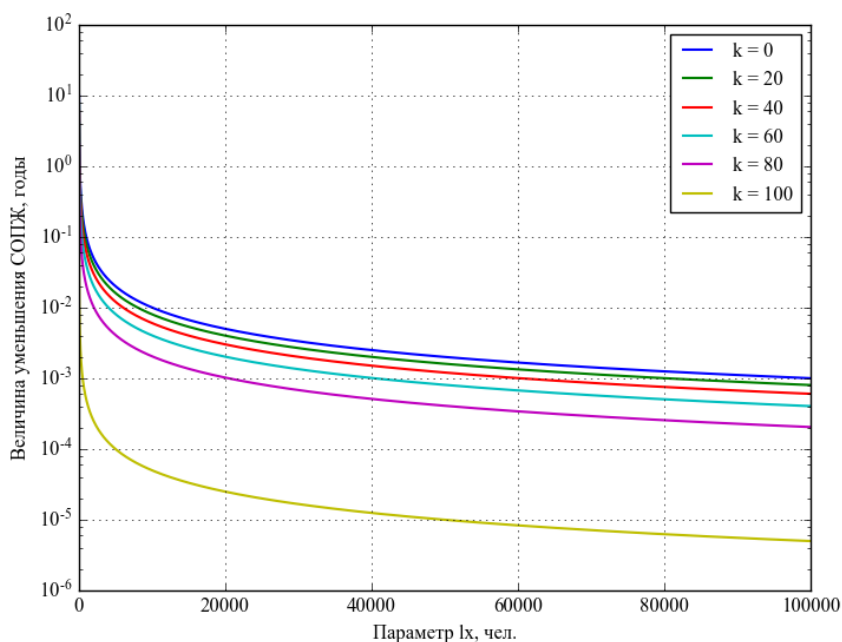


Рисунок 2.3 – График Δe в зависимости от числа доживающих l_x до определенного возраста для нескольких значений возраста погибшего k

Величина уменьшения СОПЖ Δe_i из (2.6.24) будет увеличиваться при уменьшении i , то есть при уменьшении возраста погибшего k , и уменьшаться при увеличении k .

Построим график функции новых значений СОПЖ с учетом гибели человека. Для этого будем использовать таблицу смертности городского населения мужчин России за 2011 год. Полученный график при $k = 0$ (внезапная гибель младенца) представлен на рисунке 2.4. Если построить данный график для разных значений возраста гибели k , то полученные графики *последовательно наложатся* на график функции при $k = 0$ (см. на рисунке 2.5 последовательное изменение цвета кривой – наложение кривых при разных значениях возраста погибшего).

Построим теперь разность между исходными и новыми значениями СОПЖ при условии гибели одного человека в возрасте k . Полученные графики представлены на рисунках 2.6. и 2.7. Как и в предыдущем случае, графики для разных значений возраста гибели k (рисунок 2.7) последовательно накладываются на график функции при $k = 0$ (рисунок 2.6). Видно, что графики функции разности СОПЖ имеют максимум, который достигается в возрасте 96 лет. До этого возраста разность между СОПЖ монотонно

увеличивается (то есть значение СОПЖ с учетом гибели человека уменьшается), после чего разность между СОПЖ уменьшается.

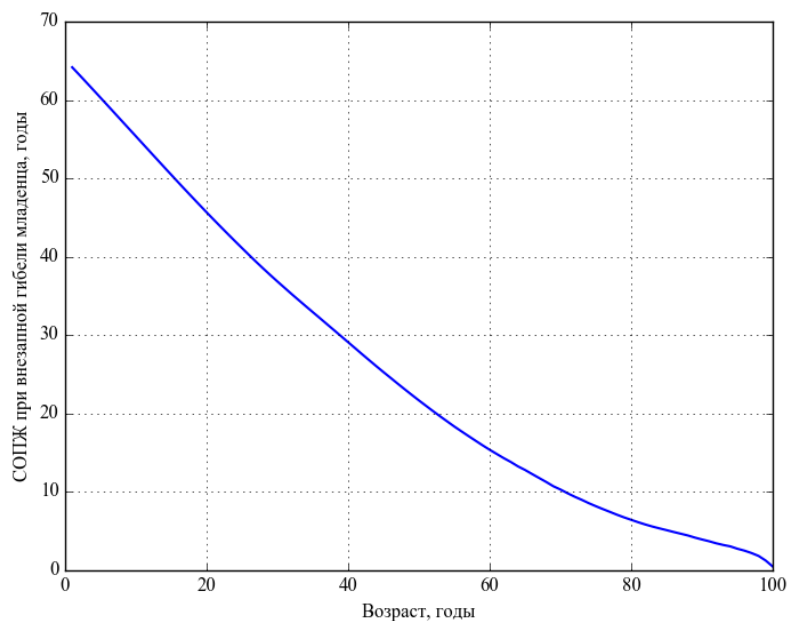


Рисунок 2.4 – График функции новых значений СОПЖ с учетом гибели одного младенца

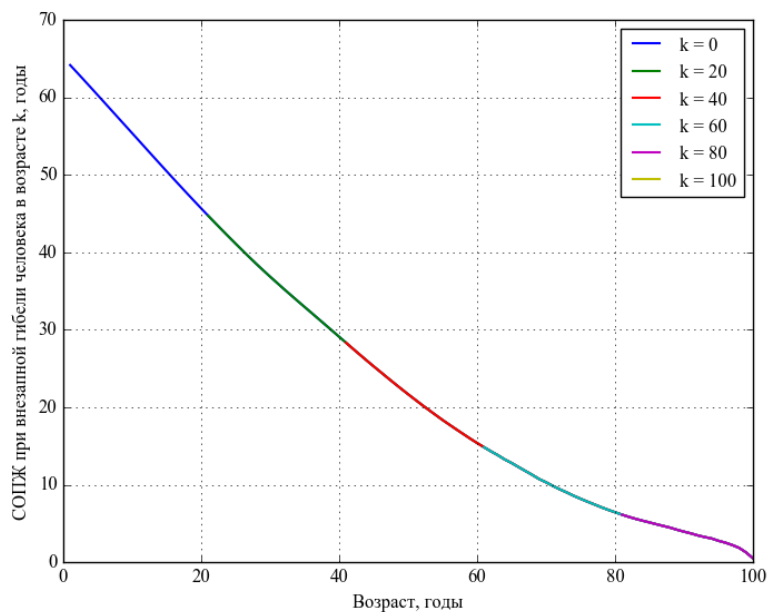


Рисунок 2.5 – Графики функции новых значений СОПЖ с учетом гибели одного человека в возрасте k

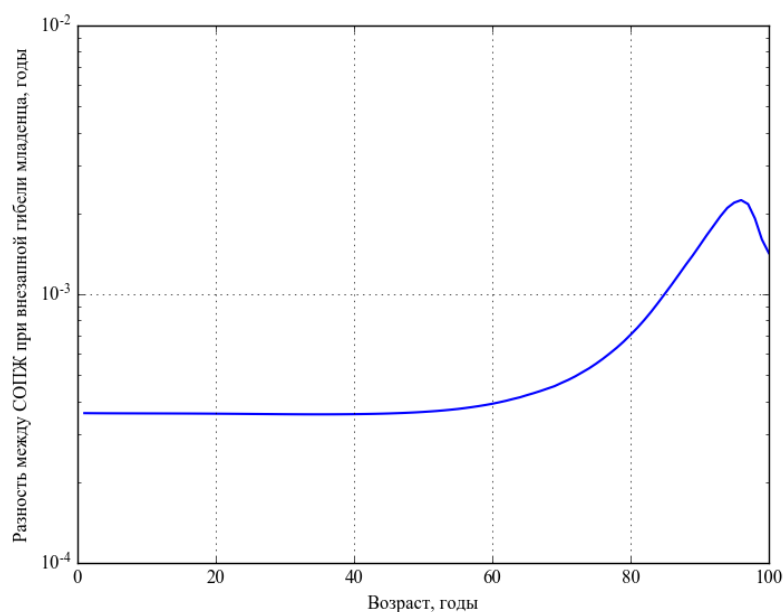


Рисунок 2.6 – График разности между исходными значениями СОПЖ и СОПЖ с учетом гибели одного младенца

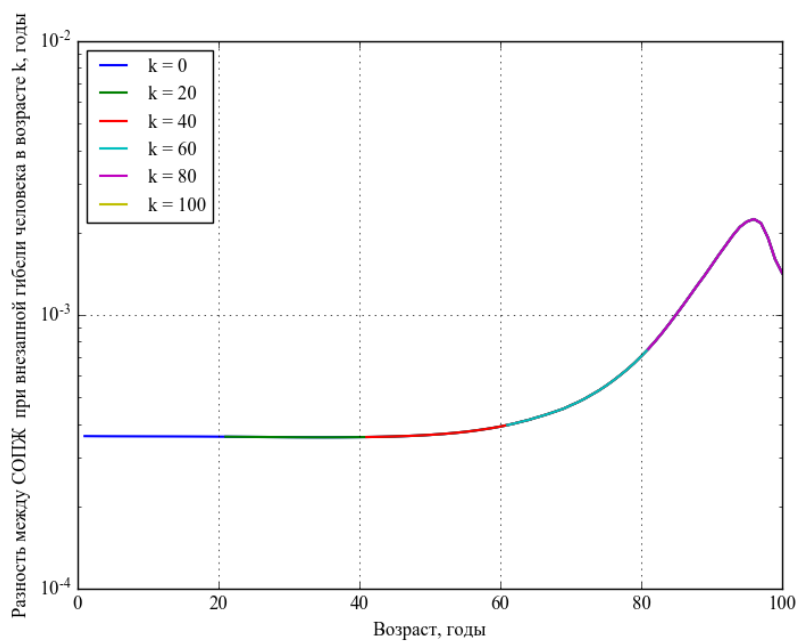


Рисунок 2.7 – График разности между исходными значениями СОПЖ и СОПЖ с учетом гибели одного человека в возрасте k

Рассмотрим случайную гибель одного мужчины в возрасте 25 лет. Согласно формулам (2.6.14), (2.6.15) имеем

$$\begin{aligned}
l_i^* &= l_i, \quad L_i^* = L_i, \quad i = 0, 1, \dots, k-1, \\
l_k^* &= l_k, \quad L_k^* = L_k - \frac{1}{2}, \\
l_{k+i}^* &= l_{k+i} - 1, \quad L_{k+i}^* = L_{k+i} - 1, \quad i = 1, 2, \dots, n-k.
\end{aligned}$$

Для верификации полученных формул произведем сравнительный расчет числа всех предстоящих человеко-лет жизни и СОПЖ по формулам (2.6.25), (2.6.26) и по полученным формулам (2.6.16)–(2.6.24).

Далее рассчитаем разность между базовыми значениями СОПЖ (исходной таблицы смертности) и полученными при условии внезапной гибели одного мужчины в возрасте 25 лет. Согласно полученным расчетам, значения T_x^*, e_x^* , вычисленные по классическим формулам (2.6.25) и (2.6.26) полностью совпали с теми же значениями, но рассчитанными по полученным формулам (2.6.16)–(2.6.24).

Полученные величины, на которые уменьшится СОПЖ поколения рассматриваемой когорты при гибели одного человека, имеют порядок $10^{-3}, 10^{-4}$ лет. Переводя данные значения в часы, получили, что СОПЖ рассматриваемого поколения уменьшится от 3 до 20 часов, в зависимости от возраста.

Влияние гибели нескольких человек одного возраста. Пусть погибло N человек в возрасте k полных лет. В этом случае формулы (2.6.14) изменятся следующим образом:

$$\begin{aligned}
l_k^* &= l_k, \\
d_k^* &= d_k + N, \\
q_k^* &= \frac{d_k^*}{l_k^*} = q_k + \frac{N}{l_k}, \\
p_k^* &= 1 - q_k^* = p_k - \frac{N}{l_k}, \\
l_{k+1}^* &= l_k^* - d_k^* = l_{k+1} - N, \\
L_k^* &= \frac{l_k^* + l_{k+1}^*}{2} = L_k - \frac{N}{2},
\end{aligned} \tag{2.6.27}$$

По аналогии со случаем гибели одного человека, величину $\frac{N}{l_k}$ можно интерпретировать как вероятность смерти одного человека при переходе от возраста k к

возрасту $k + 1$ лет или разнице между новой и исходной вероятностью умереть при переходе от возраста k к возрасту $k + 1$ лет, т.е. $\Delta q_k = q_k^* - q_k = \frac{N}{l_k}$.

Так как $l_{k+j}^* = l_{k+j} - N$ для любого $j = 1, 2, \dots, n - k$, то для $(k + i)$ -й строки ($i = 1, 2, \dots, n - k$) таблицы смертности будем иметь

$$\begin{aligned}
 l_{k+i}^* &= l_{k+i} - N, \\
 d_{k+i}^* &= d_{k+i}, \\
 q_{k+i}^* &= \frac{d_{k+i}}{l_{k+i} - N} = \frac{q_{k+i}}{1 - \frac{N}{l_{k+i}}}, \\
 p_{k+i}^* &= \frac{l_{k+i+1}^*}{l_{k+i}^*} = \frac{l_{k+i+1} - N}{l_{k+i} - N} = \frac{1 - \frac{N}{l_{k+i+1}}}{1 - \frac{N}{l_{k+i}}} p_{k+i}, \\
 L_{k+i}^* &= \frac{l_{k+i+1}^* + l_{k+i}^*}{2} = \frac{l_{k+i+1} + l_{k+i} - 2N}{2} = L_{k+i} - N,
 \end{aligned} \tag{2.6.28}$$

Тогда число всех предстоящих человеко-лет жизни будут вычисляться по формулам:

$$\begin{aligned}
 T_0^* &= \sum_{x=0}^n L_x = \sum_{x=0}^{k-1} L_x + L_k - \frac{N}{2} + L_{k+1} - N + \dots + L_n - N = \\
 &= T_0 - N \left[\frac{1}{2} + (n - k) \right].
 \end{aligned} \tag{2.6.29}$$

Для любого $i = 0, 1, \dots, k$ имеем

$$T_i^* = T_i - N \left[\frac{1}{2} + (n - k) \right]. \tag{2.6.30}$$

Тогда при $i \leq k$

$$e_i^* = \frac{T_i^*}{l_i^*} = \frac{T_i - N \left[\frac{1}{2} + (n-k) \right]}{l_i} = e_i - \frac{N \left[\frac{1}{2} + (n-k) \right]}{l_i}, \quad (2.6.31)$$

$i = 0, 1, \dots, k.$

Таким образом, гибель одного человека в возрасте k уменьшает СОПЖ людей *от нулевого и до его возраста включительно* на величину, равную

$$\Delta e_i = \frac{N \left[\frac{1}{2} + (n-k) \right]}{l_i}, \quad i = 0, 1, \dots, k. \quad (2.6.32)$$

Сравнивая формулу (2.6.19) с (2.6.32), получим, что в случае гибели N человек одного возраста величина Δe_i увеличивается в N раз по сравнению с гибелью одного человека того же возраста. Тогда графики функции, представленные на рисунке 2.3, в данном случае будут растянуты вдоль оси ординат в N раз.

Для СОПЖ людей возраста больше k получим

$$T_i^* = L_i - N + L_{i+1} - N \dots + L_n - N = T_i - N(n-i+1), \quad (2.6.33)$$

$i = k+1, \dots, n.$

$$e_i^* = \frac{T_i^*}{l_i^*} = \frac{T_i - N(n-i+1)}{l_i - N} = \frac{T_i}{l_i \left(1 - \frac{N}{l_i} \right)} - \frac{N(n-i+1)}{l_i \left(1 - \frac{N}{l_i} \right)} = \frac{1}{\left(1 - \frac{N}{l_i} \right)} \left[e_i - \frac{N(n-i+1)}{l_i} \right], \quad i = k+1, \dots, n. \quad (2.6.34)$$

В данном случае коэффициент пропорциональности равен

$$K_i = \frac{l_i}{l_i^*} = \frac{l_i}{l_i - N} = \frac{1}{1 - \frac{N}{l_i}}. \quad (2.6.35)$$

Таким образом, СОПЖ людей возраста больше k с учетом гибели N человек, получается путем уменьшения СОПЖ поколения этого возраста на величину, равную

$$\Delta e_i = \frac{N(n-i+1)}{l_i}, \quad i = k+1, \dots, n, \quad (2.6.36)$$

и умножением полученного значения на коэффициент пропорциональности K :

$$e_i^* = K_i [e_i - \Delta e_i], \quad i = k+1, \dots, n. \quad (2.6.37)$$

Влияние гибели нескольких человек разных возрастов. Рассмотрим более общий случай, когда погибло N человек в возрасте k_1, k_2, \dots, k_N полных лет. Не теряя общности, считаем, что $k_1 < k_2 < \dots < k_N$, в противном случае N человек можно перенумеровать в соответствии с этим условием.

Тогда для возрастов k_1, k_2, \dots, k_N формулы (2.6.14) изменятся следующим образом:

$$\begin{aligned} l_{k_1}^* &= l_{k_1}, \\ d_{k_1}^* &= d_{k_1} + 1, \\ l_{k_2}^* &= l_{k_2} - 1, \\ d_{k_2}^* &= d_{k_2} + 1, \\ &\dots\dots\dots \\ l_{k_N}^* &= l_{k_N} - (N-1), \\ d_{k_N}^* &= d_{k_N} + 1. \end{aligned} \quad (2.6.38)$$

Далее будем иметь:

для $(k_1 + j)$ -й строки таблицы смертности:

$$\begin{aligned} l_{k_1+j}^* &= l_{k_1+j} - 1, \\ d_{k_1+j}^* &= d_{k_1+j}, \\ j &= 1, 2, \dots, k_2 - k_1. \end{aligned} \quad (2.6.39)$$

для $(k_2 + j)$ -й строки таблицы смертности:

$$\begin{aligned}
l_{k_2+j}^* &= l_{k_2+j} - 2, \\
d_{k_2+j}^* &= d_{k_2+j}, \\
j &= 1, 2, \dots, k_3 - k_2.
\end{aligned}
\tag{2.6.40}$$

Таким образом, для $(k_i + j)$ -ой строки таблицы смертности можно записать

$$\begin{aligned}
l_{k_i+j}^* &= l_{k_i+j} - i, \\
d_{k_i+j}^* &= d_{k_i+j}, \\
i &= 1, 3, \dots, N - 1; \quad j = 1, 2, \dots, k_{i+1} - k_i.
\end{aligned}
\tag{2.6.41}$$

И наконец, для $(k_N + j)$ -ой строки таблицы смертности:

$$\begin{aligned}
l_{k_N+j}^* &= l_{k_N+j} - N, \\
d_{k_N+j}^* &= d_{k_N+j}, \\
j &= 1, 2, \dots, n - k_N.
\end{aligned}
\tag{2.6.42}$$

Таким образом, для среднего числа L_x живущих в возрасте x получим

$$\begin{aligned}
L_{k_1}^* &= L_{k_1} - \frac{1}{2} = L_{k_1} - \left(1 - \frac{1}{2}\right); \\
L_{k_1+j}^* &= L_{k_1+j} - 1, \quad j = 1, 2, \dots, k_2 - k_1 - 1; \\
L_{k_2}^* &= \frac{l_{k_2} - (2-1) + l_{k_2+1} - 2}{2} = L_{k_2} - \left(2 - \frac{1}{2}\right); \\
L_{k_2+j}^* &= \frac{l_{k_2+j+1} - 2 + l_{k_2+j} - 2}{2} = L_{k_2+j} - 2, \quad j = 1, 2, \dots, k_3 - k_2 - 1; \\
&\dots\dots\dots \\
L_{k_i}^* &= \frac{l_{k_i} - (i-1) + l_{k_i+1} - i}{2} = L_{k_i} - \left(i - \frac{1}{2}\right); \\
L_{k_i+j}^* &= L_{k_i+j} - i, \quad j = 1, 2, \dots, k_{i+1} - k_i - 1; \\
&\dots\dots\dots \\
L_{k_N}^* &= \frac{l_{k_N} - (N-1) + l_{k_N+1} - N}{2} = L_{k_N} - \left(N - \frac{1}{2}\right); \\
L_{k_N+j}^* &= L_{k_N+j} - N, \quad j = 1, 2, \dots, n - k_N - 1; \\
L_n^* &= \frac{l_n - N}{2} = L_n - \frac{N}{2}.
\end{aligned}
\tag{2.6.43}$$

Тогда число всех предстоящих человеко-лет жизни будут вычисляться по формулам:

$$\begin{aligned}
T_0^* &= \sum_{x=0}^n L_x^* = \sum_{x=0}^{k_1-1} L_x + L_{k_1} - \left(1 - \frac{1}{2}\right) + \sum_{j=1}^{k_2-k_1-1} (L_{k_1+j} - 1) + L_{k_2} - \left(2 - \frac{1}{2}\right) + \\
&+ \sum_{j=1}^{k_3-k_2-1} (L_{k_2+j} - 2) + \dots + L_{k_N} - \left(N - \frac{1}{2}\right) + \sum_{j=1}^{n-k_N-1} (L_{k_N+j} - N) + L_n - \frac{N}{2} = \\
&= \sum_{x=0}^{k_1-1} L_x + \sum_{i=1}^{N-1} \left(L_{k_i} - \left(i - \frac{1}{2}\right) + \sum_{j=1}^{k_{i+1}-k_i-1} (L_{k_i+j} - i) \right) + \\
&+ L_{k_N} - \left(N - \frac{1}{2}\right) + \sum_{j=1}^{n-k_N-1} (L_{k_N+j} - N) + L_n - \frac{N}{2} = \\
&= T_0 - \sum_{i=1}^N \left(i - \frac{1}{2}\right) - \left[\sum_{i=1}^{N-1} (k_{i+1} - k_i - 1)i + (n - k_N - 1)N + \frac{N}{2} \right].
\end{aligned} \tag{2.6.44}$$

Для любого $j \leq k_1$ имеем

$$T_j^* = T_j - \sum_{i=1}^N \left(i - \frac{1}{2}\right) - \left[\sum_{i=1}^{N-1} (k_{i+1} - k_i - 1)i + (n - k_N - 1)N + \frac{N}{2} \right], \tag{2.6.45}$$

и СОПЖ в этом случае

$$\begin{aligned}
e_j^* &= \frac{T_j^*}{l_j^*} = e_j - \frac{\sum_{i=1}^N \left(i - \frac{1}{2}\right) + \left[\sum_{i=1}^{N-1} (k_{i+1} - k_i - 1)i + (n - k_N - 1)N + \frac{N}{2} \right]}{l_j}, \\
j &= 0, 1, \dots, k_1
\end{aligned} \tag{2.6.46}$$

Для возраста k_i , $i = 1, 2, \dots, N$:

$$T_{k_i}^* = T_{k_i} - \sum_{j=i}^N \left(j - \frac{1}{2}\right) - \left[\sum_{j=i}^{N-1} (k_{j+1} - k_j - 1)j + (n - k_N - 1)N - \frac{N}{2} \right], \tag{2.6.47}$$

и СОПЖ в этом случае

$$\begin{aligned}
e_{k_i}^* &= \frac{T_{k_i}^*}{l_{k_i}^*} = \frac{T_{k_i} - \sum_{j=i}^N \left(j - \frac{1}{2} \right) - \left[\sum_{j=i}^{N-1} (k_{i+1} - k_i - 1) j + (n - k_N - 1) N - \frac{N}{2} \right]}{l_{k_i} - (i-1)} = \\
&= \frac{T_{k_i}}{l_{k_i} \left(1 - \frac{i-1}{l_{k_i}} \right)} - \frac{\sum_{j=i}^N \left(j - \frac{1}{2} \right) + \left[\sum_{j=i}^{N-1} (k_{i+1} - k_i - 1) j + (n - k_N - 1) N - \frac{N}{2} \right]}{l_{k_i} \left(1 - \frac{i-1}{l_{k_i}} \right)} = \\
&= \frac{1}{\left(1 - \frac{i-1}{l_{k_i}} \right)} \left(e_{k_i} - \frac{\sum_{j=i}^N \left(j - \frac{1}{2} \right) + \left[\sum_{j=i}^{N-1} (k_{i+1} - k_i - 1) j + (n - k_N - 1) N - \frac{N}{2} \right]}{l_{k_i}} \right), \tag{2.6.48}
\end{aligned}$$

Для возраста $k_1 + x$ ($x = 1, 2, \dots, k_2 - k_1 - 1$):

$$\begin{aligned}
T_{k_1+x}^* &= \sum_{j=x}^{k_2-k_1-1} (L_{k_1+j} - 1) + L_{k_2} - \left(2 - \frac{1}{2} \right) + \sum_{j=1}^{k_3-k_2-1} (L_{k_2+j} - 2) + \dots + \\
&+ L_{k_N} - \left(N - \frac{1}{2} \right) + \sum_{j=1}^{n-k_N-1} (L_{k_N+j} - N) + L_n - \frac{N}{2} = \\
&= \sum_{j=x}^{k_2-k_1-1} (L_{k_1+j} - 1) + \sum_{i=2}^{N-1} \left(L_{k_i} - \left(i - \frac{1}{2} \right) + \sum_{j=1}^{k_{i+1}-k_i-1} (L_{k_i+j} - i) \right) + \tag{2.6.49} \\
&+ L_{k_N} - \left(N - \frac{1}{2} \right) + \sum_{j=1}^{n-k_N-1} (L_{k_N+j} - N) + L_n - \frac{N}{2} = \\
&= T_{k_1+x} - (k_2 - k_1 - x) - \sum_{i=2}^N \left(i - \frac{1}{2} \right) - \left[\sum_{i=2}^{N-1} (k_{i+1} - k_i - 1) i + (n - k_N - 1) N + \frac{N}{2} \right],
\end{aligned}$$

Можно доказать, что для возраста $k_i + x$, ($i = 1, 2, \dots, N-1$; $x = 1, 2, \dots, k_i - k_{i-1} - 1$):

$$\begin{aligned}
T_{k_i+x}^* &= T_{k_i+x} - (k_{i+1} - k_i - x) i - \sum_{j=i+1}^N \left(j - \frac{1}{2} \right) - \\
&- \left[\sum_{j=i+1}^{N-1} (k_{j+1} - k_j - 1) j + (n - k_N - 1) N + \frac{N}{2} \right], \tag{2.6.50}
\end{aligned}$$

и СОПЖ в этом случае:

$$e_{k_i+x}^* = \frac{1}{\left(1 - \frac{i}{l_{k_i+x}}\right)} \left[e_{k_i+x} - \frac{(k_i - k_{i-1} - x)i + \sum_{j=i}^N \left(j - \frac{1}{2}\right) + \left[\sum_{j=i}^{N-1} (k_{j+1} - k_j - 1)i + (n - k_N - 1)N + \frac{N}{2} \right]}{l_{k_i+x}} \right]. \quad (2.6.51)$$

Для возраста $k_N + x$ ($x = 1, 2, \dots, n - k_N$):

$$T_{k_N+x}^* = T_{k_N+x} - N(n - k_N - x) - \frac{N}{2}, \quad (2.6.52)$$

и СОПЖ в этом случае:

$$e_{k_N+x}^* = \frac{T_{k_N+x}^*}{l_{k_N+x}^*} = \frac{1}{\left(1 - \frac{N}{l_{k_N+x}}\right)} \left[e_{k_N+x} - \frac{N(n - k_N - x) + \frac{N}{2}}{l_{k_N+x}} \right], \quad (2.6.53)$$

и для последней строки таблицы смертности:

$$T_n^* = T_n - \frac{N}{2},$$

$$e_n^* = \frac{T_n^*}{l_n^*} = \frac{T_n - \frac{N}{2}}{l_n - N} = \frac{1}{\left(1 - \frac{N}{l_n}\right)} \left[e_n - \frac{N}{2l_n} \right]. \quad (2.6.54)$$

Рассмотрим вышеописанное на примере таблицы смертности предыдущего примера. Пусть из заданной когорты случайным образом погибает четыре мужчины в возрасте 5, 12, 25 и 60 лет.

Как и в предыдущих случаях, для верификации значений параметров, вычисленных по полученным формулам (2.6.43)–(2.6.54), будем использовать прямой подход

корректировки базовой (исходной) таблицы смертности. Для этого необходимо по формулам (2.6.38)–(2.6.42) вычислить новые значения параметров l_x и на основе этих значений вычислить остальные параметры по классическим формулам (2.6.25), (2.6.26).

Далее рассчитаем разность между базовыми значениями СОПЖ (исходной таблицы смертности) и полученными при условии внезапной гибели четырех мужчин. Согласно полученным результатам, расчет значений T_x^*, e_x^* по классическим формулам (2.6.25), (2.6.26) полностью совпал с теми же параметрами, но рассчитанными по полученным формулам (2.6.43)–(2.6.54).

Величина, на которую уменьшится СОПЖ поколения рассматриваемой когорты при гибели четырех мужчин, имеет порядок 10^{-3} лет. Переводя данные значения в часы, получим, что СОПЖ поколения уменьшится примерно от 13 до 65 часов, в зависимости от возраста.

На рисунке 2.8 представлен график разности между СОПЖ поколения исходной когорты и СОПЖ этой же когорты при гибели четырех мужчин.

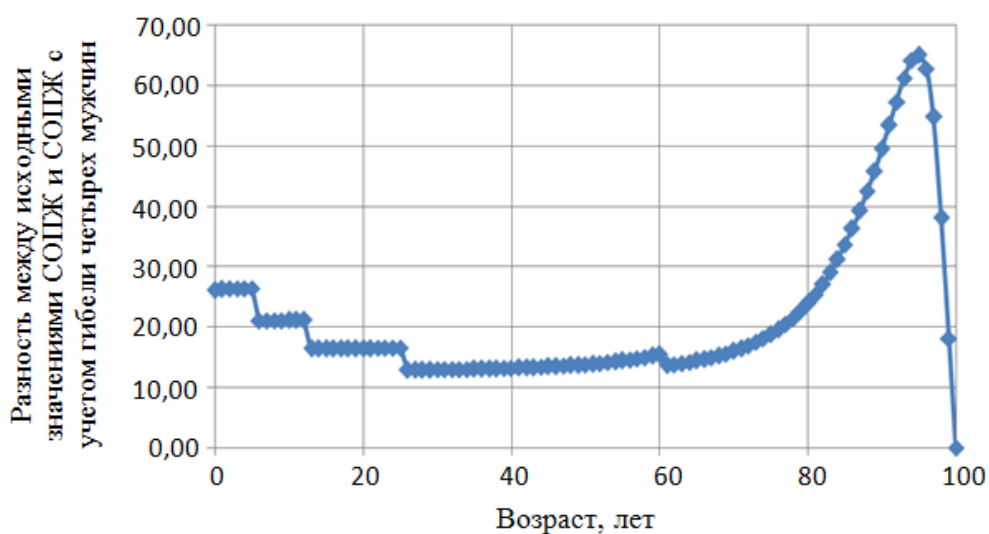


Рисунок 2.8 – График разности между СОПЖ поколения исходной когорты и СОПЖ этой же когорты при внезапной гибели четырех мужчин возрасте 5, 12, 25 и 60 лет

2.7 Выводы к разделу 2

Относительное изменение СОПЖ – очень важная величина, которая используется при расчете таких показателей как: статистическая стоимость жизни и (социальная) готовность платить (на основе индекса качества жизни); стоимость спасения одной жизни; а также в критерии приемлемости инвестиций в проекты по снижению риска и принципе предельных затрат на сохранение жизни.

Главное преимущество работы – относительное изменение СОПЖ оценивается с помощью закона Гомперца-Мейкхема, который описывает смертность с помощью математической модели, состоящей из двух компонент: экспоненциально растущей с возрастом и независимой от возраста (случайная смерть).

В других работах оценка относительного изменения СОПЖ производится с помощью демографической константы, в зависимости от вида функции уменьшения интенсивности смертности. Для простых линейных случаев, производится осреднение по СОПЖ рассматриваемой таблицы смертности. В более сложных случаях, оценка производится с помощью разложения в ряд Тейлора. Оба эти подхода дают лишь приблизительную оценку.

СОПЖ выбрана в качестве первого интегрального показателя величины риска, поскольку он является императивным показателем устойчивого развития государства.

Работа является частью НИР НИЦ по оценке средств (доли бюджета), которые могут быть выделены на снижение аварий и катастроф компонент ВКИ и, соответственно, каково будет уменьшение числа смертей природно-техногенного типа на рассматриваемой территории, и как это количественно повлияет на величину СОПЖ региона.

3 Алгоритм, использующий конвергентную MAICS-технологии оценки индивидуальной надежности уникальных конструкций на стадии их проектирования, изготовления и эксплуатации на основе метода, разработанного в НИЦ УрО РАН (применительно к изделиям ракетно-космической техники, перспективным атомным реакторам на свинцовом теплоносителе, уникальным высотным зданиям)

3.1 Введение. Особенности методологии оценки индивидуальной конструкционной надежности

В данном разделе представлена оригинальная методология и алгоритм количественной оценки надежности чрезвычайно дорогих наукоемких объектов, уникальных изделий/устройств/систем – компонент критических/стратегических инфраструктур, изготавливаемых малыми сериями или даже в единичном экземпляре, которая получила название теория индивидуальной конструкционной надежности (ТИКН). В работе ТИКН изложена на примере поворотных конструкций телекоммуникационных спутников (робототехнические комплексы одноразового раскрытия на орбите, предназначенные для бесперебойной работы в течение не менее 12–15 лет в условиях ближнего космоса).

Рассматривается оригинальная методология количественной оценки надежности чрезвычайно дорогих наукоемких объектов, уникальных изделий/устройств/систем – компонент критических/стратегических инфраструктур, изготавливаемых малыми сериями или даже в единичном экземпляре, которая получила название *теория индивидуальной конструкционной надежности*.

Доля уникальных изделий во всех отраслях современного машиностроения и смежных секторах промышленности (судо-, авиастроении) с развитием современных цифровых 3D технологий непрерывно растет. Этот класс технических объектов, как правило, невозстанавливаемых устройств/систем в данном параграфе представлен складными робототехническими комплексами одноразового раскрытия на орбите, предназначенных для бесперебойной работы в течение не менее 12–15 лет в условиях ближнего космоса.

Несмотря на императивную важность проблемы оценка надежности единичных изделий остается одной из нерешенных задач современной теории конструкционной надежности. Во многом это объясняется тем, что среди проектировщиков таких систем и специалистов в области их надежности сформировалось устойчивое (но глубоко

ошибочное) мнение о том, что современная теория конструкционной надежности принципиально не способна решить эту проблему [1, 9].

Логика конструкторов уникальных механических систем, считающих, что современная теория надежности неприемлема для оценки прогнозных значений параметров конструкций единичного изготовления, зиждется на том, что не понятно, как построить соответствующую генеральную совокупность (ГС) таких параметров [3]. Если ГС для нагрузок, воздействий и материалов сами по себе вполне доступны для построения и изучения, то для параметров уникальных конструкций (УК) такие совокупности принципиально не существуют и нет адекватных способов их построения. Предложения [1, 9] построить виртуальные множества таких систем, основанные на институциональном знании, экспертных оценках и здравом смысле, или результатах компьютерного моделирования натываются на необходимость учета эпистемной и алеаторной составляющих (которые в данном случае сами по себе являются *terra incognita*) данных сугубо эмпирических моделей. Поэтому построение виртуального множества таких конструкций неизбежно приводит к неприемлемо расплывчатым, нечетким и во многом умозрительным значениям их возможных стохастических свойств, по которым невозможно получить требуемые робастные (т.е. нечувствительные к малым возмущениям) оценки качества *высоконадежных систем*.

Специфика уникальных систем, которая должна быть учтена при проектировании, помимо их уникальности и невозстановливаемости, заключается в первую очередь в том, что они [17, 18]:

- 1) изначально должны удовлетворять некоторым безусловным массогабаритным и иным требованиям заказчика,
- 2) должны рассматриваться как многокомпонентные структурные системы/инфраструктуры,
- 3) могут, в общем случае, отказать по множеству разнородных критериев отказа,
- 4) испытывают воздействие сочетания и комбинации различных, возможно взаимозависимых, специфических нагрузок и воздействий в виде стохастических функций времени, характерных для ближнего космоса (при этом часть воздействий на систему генерируется внутри самой системы),
- 5) изготовлены из большого числа разнородных по своим свойствам конструкционных материалов и конструктивных элементов,
- 6) komponуются из агрегатов, комплектующих, узлов и деталей от производителей с разными уровнями культуры производства, которые поступают к месту сборки уникального изделия разными средствами транспорта,

- 7) на всех этапах проектирования, изготовления, сборки, тестирования и отладки испытывают воздействие разнородного по своим компетенциям и умениям человеческого фактора.

Используемый в практике проектирования и конструирования уникальных систем консерватизм конструкторско-технологических решений позволяет давать лишь качественные оценки их (якобы высокой) надежности и не дает необходимой гарантии качества. Ниже приводятся основы *теории индивидуальной конструкционной надежности* (ТИКН), разработанной научным руководителем НИЦ С.А. Тимашевым изначально для проектирования многокомпонентных систем в виде стальных и железобетонных многопролетных и многоэтажных рам и их элементов на сочетании случайных нагрузок марковского типа [2, 6]. Впоследствии эта методология была использована для оценки индивидуальной конструкционной надежности магистральных трубопроводов различного назначения [7, 8], а также при конструировании каркасов атомных реакторов. В данном параграфе она изложена применительно к УК, в частности, на примере поворотных конструкций телекоммуникационных спутников.

3.2 Основные положения теории индивидуальной конструкционной надежности

Для понимания дальнейшего изложения приведем вкратце основные положения теории индивидуальной конструкционной надежности [4–6]. Отметим сначала, что проблема учета различных *врожденных неопределенностей*, стоящая перед всеми научно-инженерными дисциплинами, получила свое первоначальное разрешение в строительной механике, где было выработано понятие *предельного состояния* системы. Разработанная при этом концепция получила название *расчет по схеме «нагрузка–сопротивление/прочность»*.

Со временем оказалось, что эта концепция является *универсальной* и может с успехом применяться при оценке не только *конструкционной надежности* любых инженерно-технических сооружений и инфраструктур, изделий машино-судо-авиастроения и космической техники, но и их *функциональной надежности*, а также для решения ряда важных технико-экономических задач [16]. При этом идиома «нагрузка–сопротивление» заменяется соответственно на «спрос–предложение» (в задачах экономики), «спрос–запас» (в транспортно-логистических задачах производства, складирования и хранения), «потребность (необходимость) – возможность ее удовлетворения» (в задачах живучести, безопасности и стратегической готовности инфраструктур, предоставления социальных услуг). Отметим также, что стохастическая идиома «спрос–предложение» в экономике может рассматриваться как вероятностный аналог уравнений равновесия и совместности деформаций в механике деформируемых систем. Таким образом, в общем случае под нагрузкой (спросом, потребностью и т. п.) понимается воздействие на систему любой природы (физической, экономической, логистической, социальной и т. п.), которое может привести к отказу или влиять на ее выходной эффект. Соответственно под сопротивлением (прочностью, предложением, запасом, удовлетворением спроса и т. п.) следует понимать свойство (условие) системы противостоять действующей на него нагрузке [16].

В целях дальнейшего изложения понадобится также понимание природы генеральной совокупности для индивидуального изделия, которая, как упоминалось выше, проектировщиками УК и специалистами в области надежности до сих пор считается отсутствующей, поскольку именно в силу своей уникальности не принадлежит какой-либо реально существующей генеральной совокупности однородных изделий, и для него невозможно *достоверно* построить какую-либо адекватную виртуальную ГС – математическую модель.

Тем не менее и для единичной конструкции возможно построить ее ГС, которая, однако, будет иметь совсем другую природу и смысл. Для построения такой ГС необходимо эту единичную конструкцию всесторонне и многократно измерить и продиагностировать на каждом этапе ее изготовления, комплектации, сборки и отладки. Поскольку из теории измерений известно, что истинные размеры и любые другие показатели объекта принципиально неизмеримы (в том смысле, что все измерения неизбежно содержат ошибки измерения), то, имея такие наборы измерений (свойств материала, фактически использованном в уникальном изделии с помощью неразрушающих методов контроля, геометрии и размеров его деталей, размерных цепей и т.д.), можно построить гистограммы, а по ним и функции плотности вероятностей (ФПВ) ошибок измерений всех критически важных для оценки надежности параметров системы.

Эти ФПВ могут иметь различный вид (рисунки 3.1–3.5) в зависимости от точности и прецизионности измерений. Чем точнее измерения, тем уже кривая функции плотности вероятностей (см. рисунки 3.2–3.4). При этом следует иметь в виду, что изменчивость свойств материалов и критичных параметров таких конструкций должна быть минимальна (см. рисунки 3.3–3.5) и определяется не разбросом свойств реального или виртуального множества однотипных изделий, а исключительно точностью и прецизионностью измерения этих свойств и параметров на всех этапах создания данного *уникального* образца изделия. При таком подходе все необходимые для решения задачи надежности статистические данные оказываются *в принципе доступными* и могут быть собраны в ходе проектирования, конструирования, изготовления, сборки, испытаний, отладки устройства и последующей их интерпретации. Однако это знание (и сама возможность применения теории индивидуальной конструкционной надежности) требует соответствующих организационных усилий и культуры производства (как правило, значительно выше существующих).

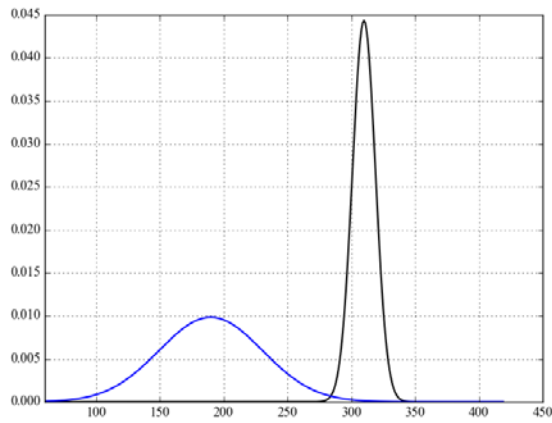


Рисунок 3.1 – Визуализация классической задачи конструкционной надежности по схеме «нагрузка-сопротивление»

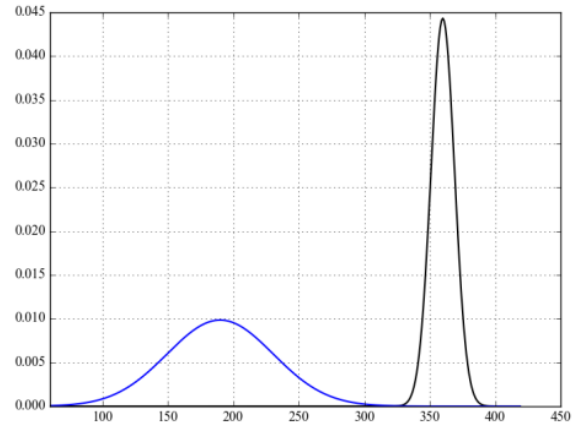


Рисунок 3.2 – Разнесение ФПВ нагрузки и сопротивления для увеличения надежности изделия

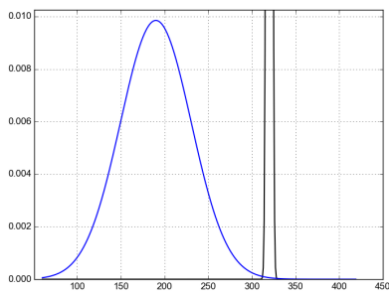


Рисунок 3.3 Классическая задача индивидуальной надежности (ФПВ сопротивления получено за счет измерений и диагностики)

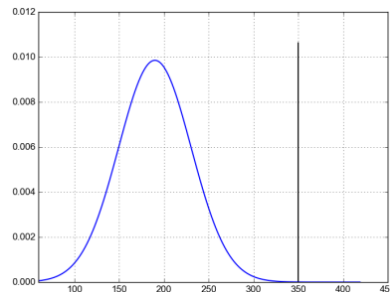


Рисунок 3.4 – Решение задачи индивидуальной надежности с использованием одной реализации (одного квантиля сопротивления)

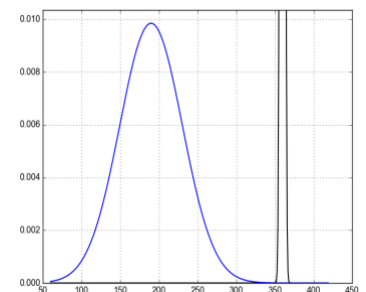


Рисунок 3.5 – Разнесение ФПВ нагрузки и сопротивления в задаче индивидуальной надежности (в том числе за счет конструкторских и технологических решений)

3.3 Основные схемы расчета индивидуальной конструкционной надежности деформируемых систем

Перейдем к описанию *основных схем расчета индивидуальной конструкционной надежности деформируемых систем.*

Первая, базовая схема расчета кардинально решает проблему проклятия размерности задачи надежности многокомпонентной системы, подверженной действию сочетания нагрузок и воздействий различной природы с учетом физических, технических, технологических и эксплуатационных аспектов. При классическом подходе размерность задачи конструкционной надежности равна произведению числа структурных элементов системы на число нагрузок и воздействий на нее. В описываемой ниже схеме расчета эта размерность равна или меньше числа нагрузок на систему, что может быть в $10-10^4(10^5)$ раз меньше, чем в классическом случае [4–6]. Эта схема идеально подходит для основных случаев расчета УК, когда на конструкцию действует сочетание случайных нагрузок и воздействий, либо когда внутренние или внешние воздействия более адекватно описываются ступенчатыми (недифференцируемыми) процессами времени, либо когда задача требует вычисления вероятностей невыхода случайного процесса за невысокие уровни [4–6]. Она складывается из четырех этапов.

На первом этапе производится схематизация системы, т.е. выбор пространства Q входных параметров q и пространства U выходных параметров u . Тем самым вводится оператор системы L :

$$Lu = q; u \in U; q \in Q. \quad (3.3.1)$$

Выбор математического оператора L производится на основании технико-экономических соображений с учетом технологических, эксплуатационных требований, а также возможностей доступных вычислительных средств.

На втором этапе в операторе L выделяются элементы $\kappa, \kappa_0, \kappa_c$, где κ, κ_0 – элементы из пространства K детерминированных свойств системы, которые соответственно не подлежат (κ) и подлежат оптимизации (κ_0); κ_c – элементы пространства K_c тех свойств системы, которые считаются случайными.

На третьем этапе из решения *обратной задачи механики* в пространстве U определяется подпространство качества $V \subseteq U$, а по нему – допустимая область (ДО)

$\Omega_0(\kappa_c)$ в пространстве Q . В настоящее время выбор пространства V не алгоритмизирован и в значительной степени зависит от интуиции и опыта конструктора (и/или расчетчика).

На четвертом этапе отыскивается условная надежность системы:

$$R_y(t) = P[q(\tau) \in \Omega_0(\kappa_c), 0 \leq \tau \leq t], \quad (3.3.2)$$

а по ней – полная надежность:

$$R(t) = \int \dots \int_{\kappa_c} R_y(t) f(\kappa_c) d\kappa_c. \quad (3.3.3)$$

Таким образом, по данной схеме задача индивидуальной конструкционной надежности решается всегда в пространстве нагрузок или, как показано ниже, в пространстве *критичных конструктивных параметров системы*. Использование этой схемы максимально упрощает стохастическую задачу и снижает размерность задачи на один-два и более порядков.

В описанной выше схеме допустимая область строится согласно уравнению

$$v_* = H(q, \kappa_c), \quad (3.3.4)$$

где

v_* – предельно допустимое значение вектора качества системы,

H – оператор, обратный оператору L .

Операторы L , H отражают уровень сложности постановки детерминированной задачи (поскольку значение вектора κ_c при этом фиксируется). Это означает, что каждый раз рассматривается надежность конкретной (индивидуальной) конструкции), которая решается с учетом современных достижений механики деформируемых сред и возможностей доступных вычислительных ресурсов. Такой подход позволяет строить в пространстве Q частные допустимые области по каждому i -му критерию качества (см. рисунок 3.6, а.) Их пересечение дает допустимую область по всем критериям качества одновременно:

$$\Omega_0 = \bigcap_{i=1}^N \Omega_0^{(i)}. \quad (3.3.5)$$

Этим способом нетрудно найти области, где происходят какие-либо один, два, три и т. д. типа отказа одновременно. Например, согласно рисунка 3.6, *а*:

$$\bar{\Omega}_i = \Omega_0^{(i+1)} - \Omega_0^{(i)} \cap \Omega_0^{(i+1)}; \quad \bar{\Omega}_{(i+1,i+2)} = \Omega_0^{(i)} - \Omega_0^{(i)} \cap \Omega_0^{(i+2)} \quad \text{и т.д.} \quad (3.3.6)$$

Если для многоэлементной системы (инженерной структуры) можно построить допустимую область для каждого элемента по какому-либо критерию (рисунок 3.6, *б*), их пересечение даст допустимую область для системы в целом по этому же критерию. Прodelывая эту процедуру для всех критериев качества, можно свести задачу отыскания допустимой области для системы по всем критериям качества к схеме (рисунок 3.6, *а*).

Достоинствами изложенного подхода являются наглядность и простота интерпретации существа задачи. Действительно, еще до начала вычисления функции надежности конструктору ясно, какие критерии качества наиболее жесткие (на рисунке 3.6, *а*, это критерии *i* и *i + 1*), какие элементы не участвуют в формировании допустимой области (например, на рисунке 3.6, *б* – элементы 3, 5 и 6). Это позволяет выделить элементы с избыточной надежностью и наметить конструктивные мероприятия по снижению их надежности (и, соответственно, массы УК) до уровня, не влияющего на общую надежность системы.

Если рассматривается задача управления надежностью УК в классе двухуровневой политики управления, то учитывается предупреждающий U_* и физический U_{**} отказы (рисунок 3.6, *в*).

Под *предупреждающим* отказом понимается некоторое состояние системы, сигнализирующее о возможном нарушении ее функционирования в ближайшем будущем, или отказ, вызывающий небольшой ущерб. Допустимые области для каждого отказа представлены на рисунке 3.6, *в*, из которого видно, что $U_* \in U_{**}$ и $\Omega(U_{**}) > \Omega(U_*)$.

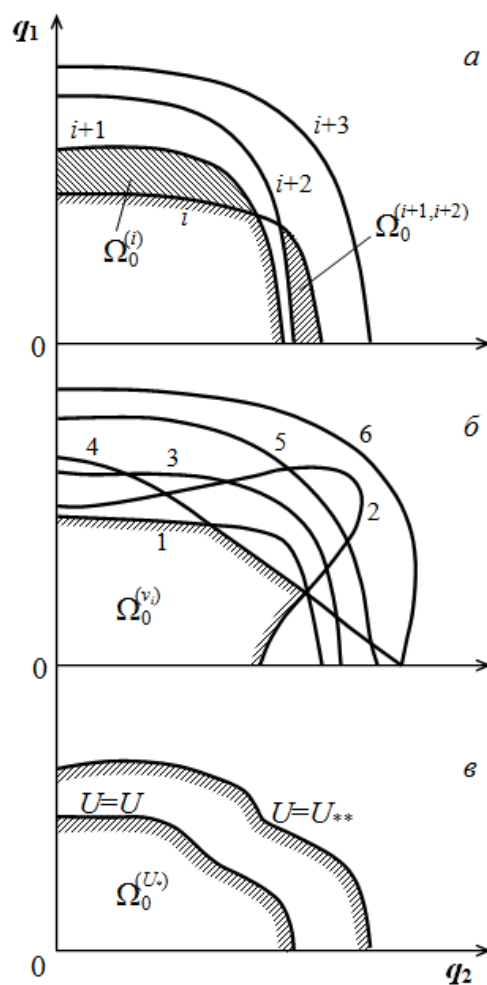


Рисунок 3.6 – Допустимые области в пространстве нагрузок

Задача теперь состоит в том, чтобы не допустить выход вектора нагрузок из области $\Omega(U_*)$ или, если он все же вышел, не допустить возникновение физического отказа – выход $q(\tau)$ из области $\Omega(U_{**})$. Для этого необходимо знать, сколько времени понадобится $q(\tau)$, чтобы преодолеть расстояние от границы $\Gamma(U_*)$ до границы $\Gamma(U_{**})$, и какой метод и средство управления применить, чтобы реализовать эту политику. В данном параграфе эти задачи не рассматриваются, но они могут оказаться необходимыми при оценке надежности УК нового поколения (снабженные подсистемами самодиагностики и мониторинга) на стадии их эксплуатации на орбите.

Поскольку допустимые области строятся для *фиксированного значения* случайного вектора κ_c , получаемая с их помощью функция надежности является условной. Интегрирование ее с весом (долевым соотношением значимости) $f(\kappa_c)$ дает безусловную функцию надежности. Таким образом, вся случайность сосредоточена в допустимой

области (ее форме и величине). Функция плотности вероятностей $f(\kappa_c)$ строится в процессе изготовления индивидуального изделия.

Под влиянием физических и химических воздействий качество конструкций изменяется во времени. В этом случае используется *вторая схема оценки надежности* механического устройства. Первые два этапа оценки остаются при этом прежними, а условная функция надежности запишется как

$$R_y(t) = P[q(\tau) \in \Omega_0(\tau | \kappa_c), 0 \leq \tau \leq t], \quad (3.3.7)$$

т.е. она определяется в каждый момент времени с учетом эффекта «съезживания» допустимой области (рисунок 3.7).

Если произвести консервативную ступенчатую аппроксимацию допустимой области во времени (см. рисунок 3.7), то

$$R_y(t) = \prod_{i+1}^n P_{yi} [q(\tau) \in \Omega_0^{(i)}(\tau_i | \kappa_c), \tau_{i-1} \leq \tau \leq \tau_i | q(\tau) \in \Omega_0^{(k)}(\tau_k | \kappa_c), \tau_{k-1} \leq \tau \leq \tau_k], \quad (3.3.8)$$

$$k = i-1, \dots, 1, \tau_0 = 0,$$

поскольку надежность стареющей таким образом системы должна вычисляться по схеме последовательного соединения. Правило вычисления полной надежности (3.3.3) остается при этом без изменений.

В некоторых случаях задача с самого начала ставится как задача долговечности, например при рассмотрении длительной и малоцикловой прочности, многоцикловой усталости, устойчивости при ползучести и т.п. Здесь используется *третья схема вычисления надежности* системы, согласно которой на первом этапе вычисляется детерминированная долговечность:

$$T = L(q, \kappa_c), \quad (3.3.9)$$

где

q – вектор внешнего воздействия,

L – оператор.

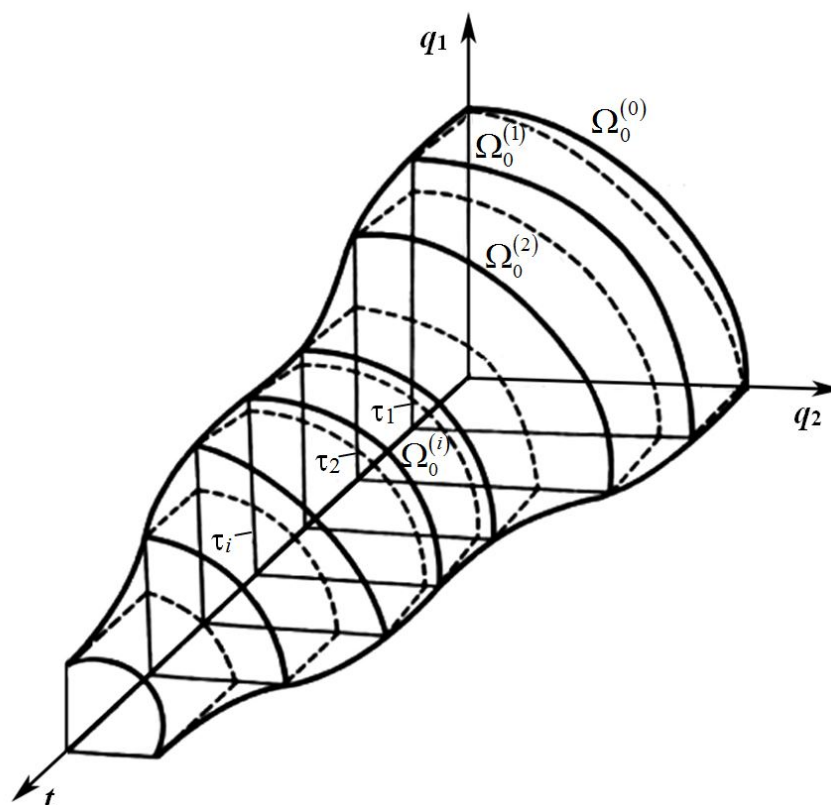


Рисунок 3.7 – Допустимая область, изменяющаяся во времени

При выборе оператора L автоматически назначается пространство качества и область допустимых состояний, так как без решения этих вопросов не удастся однозначно определить оператор. На втором этапе в операторе L выделяются элементы κ_c , являющиеся носителями случайности.

На третьем этапе методом условных функций отыскивается плотность вероятности долговечности:

$$f(T) = \int_{\psi(\kappa_c) < T} f(\kappa_c) d\kappa_c, \quad (3.3.10)$$

где

$f(\kappa_c)$ – совместная плотность параметров κ_c ,

$\psi(\kappa_c)$ определяется уравнением (3.3.9).

В некоторых случаях можно сразу определить моменты стохастической долговечности. Тогда плотность распределения долговечности строится с помощью

разложения в ряды Грама–Шарлье или Эджворта, а также с помощью метода максимума энтропии.

На четвертом этапе находится надежность системы:

$$R(t) = \int_0^t f(T) dT. \quad (3.3.11)$$

Изложенные схемы расчета надежности уникальных механических систем УК дополняют друг друга и позволяют давать оценку надежности для всех встречающихся на практике случаев. Во всех схемах функция надежности $R(t)$ определяется как результат учета важнейших факторов внешней среды, свойств системы, технологических и эксплуатационных требований.

В случае прогнозирования надежности единичной функционирующей системы можно воспользоваться *следующей схемой расчета*. На основе уравнений (3.3.1) и (3.3.5) строится допустимая область $\Omega_q(t)$ в пространстве Q размерности m на момент t и определяются координаты изображающей точки $d(x_q)$. В этом пространстве под изображающей точкой $x_q = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ понимается точка, координаты которой суть нагрузки и воздействия, действующие на систему в момент анализа t . Если $d(x_q) \in \Omega_q$, то надежность системы $R(t) \equiv 1$, если $d(x_q) \notin \Omega_q$, то $R(t) \equiv 0$.

На основе кинетических уравнений, полученных по данным измерений и наблюдений за параметрами x системы за время t , находится уравнение эволюции допустимой области:

$$\Omega_q(\tau) = \Omega_q(x, \tau), \quad (3.3.12)$$

где

x – вектор параметров, определяющих конфигурацию и размер допустимой области.

По априорным данным о нагрузках и процессах потери качества системы $q(\tau)$ с помощью Байесовского подхода строятся апостериорные характеристики этих же процессов $q^{(a)}(\tau)$, а по ним отыскивается вероятность:

$$P(\tau, x) = P\left[q^{(a)}(\tau) \in \Omega_q(\tau|x), t < \tau \leq T\right] \quad (3.3.13)$$

и прогнозируемая надежность:

$$R_p(\tau) = \int P(\tau, x) f(x) dx, \quad (3.3.14)$$

где

$f(x)$ – совместная плотность распределения величин x (интеграл берется по области существования x).

Другим способом вычисления функции надежности является следующий:

$$R_p(\tau) = P \left\{ \int_t^T v_d^{(a)}(\tau) d\tau < r_t \right\}, \quad (3.3.15)$$

где

r_t – расстояние до границы допустимой области в момент t ,

$v_d^{(a)}(\tau)$ – апостериорная относительная скорость сближения изображающей точки и границы допустимой области, полученная по результатам измерений за время $[0, t]$.

Если после прогнозирования получаются неудовлетворительные результаты, то необходимо скорректировать модели наблюдаемых случайных процессов, уменьшить время между моментами измерений, увеличить глубину контроля. Обычно глубина прогноза $(T - t) \leq t/10$.

Владея описанными выше схемами расчета, конструктор может так распорядиться этим знанием, чтобы обеспечить необходимый уровень надежности для каждой допустимой области. Если стоимость многократных измерений неподъемна, то можно остановиться на малой выборке ($< 25-30$) и применить к ней процедуру бутстреп/перевыборки, что позволит получить искомые вероятности с необходимой состоятельностью. Можно также выбрать какой-то квантиль (скажем, порядка 0,001) прочности материала и решить задачу надежности с его помощью. Таким образом, в рамках излагаемой методологии индивидуальная конструкционная надежность есть особая разновидность общей теории конструкционной надежности. Как отмечено выше, для ее использования на практике необходимо иметь технологию и культуру производства, позволяющие собирать, на каждом переделе, всю необходимую, достаточную и состоятельную статистическую информацию о параметрах создаваемой единичной конструкции. Эти расходы на изменение технологической культуры производства быстро

окупаются, поскольку составляют не более 5–10 % от стоимости одного неудачного запуска УК. Следует отметить, что концепция такой технологии, разработанная в НИЦ «Надежность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН, для оценки надежности, вероятности отказа и остаточного ресурса отдельных участков магистральных нефтегазопроводов, получила признание в мировой трубопроводной промышленности [7, 8].

3.4 Применение теории индивидуальной конструкционной надежности к анализу надежности поворотной штанги уникальных конструкций (УК)

Для наглядного представления возможностей ТИКН *применительно к космическим аппаратам, продемонстрируем их* на реальном примере оценки комплексной индивидуальной конструкционной надежности поворотной однозвенной штанги магнитометра УК GPS (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – УК GPS с раскрытыми панелями солнечной батареи и штангой магнитометра

Конструктивная схема штанги без магнитометра приведена на рисунке 3.9. В общем случае на свободном конце штанги могут размещаться приборы и оборудование различного назначения, например антенны, панели солнечной батареи, устройства ориентации, стабилизации и пр., необходимые для работы бортовых систем УК, а также научная аппаратура.

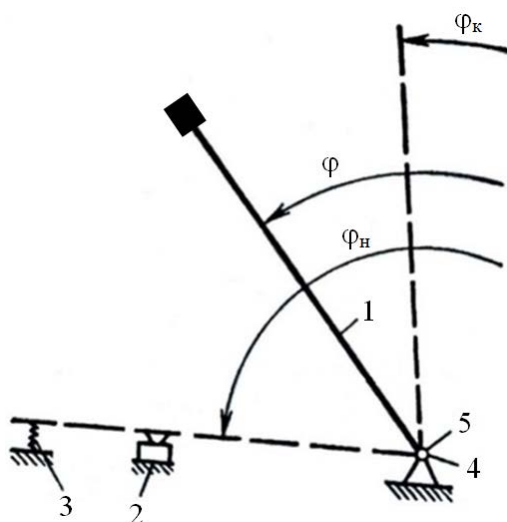


Рисунок 3.9 – Схема поворота штанги из сложенного состояния в рабочее положение

В сложенном положении φ_n штанга 1 закреплена на опорном основании УК с помощью замка зачековки 2. После расчеховки замок 2 освобождает штангу 1, которая под действием толкателя 3 и пружины кручения (на рисунке 3.9 не показана), установленной в шарнире 4, поворачивается и фиксируется в конечном угловом положении φ_k с помощью защелки 5 (на рисунке 3.9 не показана).

Решение задачи в стохастической постановке с применением классической теории надежности [2, 9] сводит задачу надежности поворота штанги к обеспечению двух условий:

- прочности – сопротивления нагрузкам в сложенном положении и при фиксации в рабочем положении,
- функционирования при повороте штанги – превышения движущего момента на приводе над моментом сил сопротивления (шарнира и защелки конечного положения) как на всем пути движения, так и в самом его конце.

Такое решение задачи имеет определяющее значение при выборе параметров работоспособности штанги на этапе проектирования, однако не учитывает конструкторских и технологических факторов при конструировании, технологической подготовке и производстве.

Безотказная работа штанги обеспечивается за счет последовательного выполнения ее конструктивными элементами следующих функций (условий) [17, 18, 3]:

- сохранение прочности/целостности штанги от нагрузок в сложенном положении,
- недопущение несанкционированного снятия механических связей в замке,

- прохождение электрического сигнала на электрозапал пиропатрона по заданной команде,
- срабатывание пироустройства,
- разделение механических связей в замке,
- отделение штанги от опорного основания (УК),
- поворот штанги на заданный угол,
- фиксация штанги в рабочем положении,
- обеспечение заданных параметров в рабочем положении.

Для данного примера существует, как минимум, *девять* условий, которые должны быть *безусловно* выполнены для успешного разворота штанги. Любое из условий может быть разбито на ряд подусловий (как разветвлений возможных причин отказов критичных элементов в рамках главного функционального условия), каждое из которых должно быть отражено в технической (конструкторской и технологической) документации в требованиях к изготовлению и техническому контролю. Причем отказ по каждому из условий (подусловий) определяется не только генезисом причин отказов (принятыми конструкторскими и технологическими решениями на предэксплуатационных стадиях жизненного цикла), но и условиями режимов эксплуатации, что должно быть учтено при анализе и оценке их надежности.

Для поворотной штанги выполнение каждого из перечисленных условий возможно при отсутствии причин отказов критичных элементов ее конструкции, причем набор таких причин зависит от конкретного (индивидуального) конструктивного исполнения штанги [17, 3]. Приведем набор возможных причин отказов для каждого из условий поворота штанги, приведенных в [17, 18, 3].

1) Условие обеспечения прочности/целостности штанги от нагрузок в сложенном положении [17, 18, 3].

Причинами отказа при раскрытии штанги вследствие невыполнения данного условия могут быть разрушения элементов конструкции замков и механизмов раскрытия (потеря несущей способности), пластические деформации в исполнительных органах и сопряжениях механизмов раскрытия, ухудшающие их работу (недопустимые деформации), изменения взаимоположения деталей механизма при вибрациях (недостаточная вибростойкость), недопустимое утонение толщины твердого смазывающего слоя в трибосопряжениях (нарушения условий смазки), недопустимые амплитуды виброперемещений, приводящие к попаданию в механизм раскрытия посторонних предметов (блокировка раскрытия); нарушение подвижности в высоконагруженных элементах конструкции механизмов в вакууме (холодная сварка).

2) Условие недопущения несанкционированного снятия механических связей в замке.

Помимо разрушения замков, причинами отказа могут быть следующие явления: электростатический пробой, приводящий к самосрабатыванию (самораскрытию) замка – инициатора раскрытия; недопустимые деформации в механизмах замков зачехловки (недопустимая деформация).

3) Условие прохождения электрического сигнала на электрозапал пиропатрона по заданной команде.

Причинами отказа могут быть механический обрыв питающего провода или окисление контакта (разрыв электрической цепи).

4) Условие срабатывания пироприбора.

Отказ может произойти из-за несрабатывания пироприбора, неразрушения чеки, неосвобождения механической связи между пироприбором и замком (например, из-за попадания клея).

5) Условие неразделения механических связей в замке.

Отказ могут быть вызван недостаточным ходом исполнительных механизмов; недостаточной энергией приводных пружин замка; попаданием в механизм замка обособленных частиц; неправильной регулировкой элементов механизма замка (неучет возможных перемещений под действием гравитации) и т.п.

6) Условие отделения штанги от опорного основания.

Причинами отказа могут быть: заклинивание подвижных элементов замка вследствие монтажных и тепловых деформаций; возникновение помех на пути движения отделяемых частей замка при выходе из зоны сопряжения с неподвижными частями; недостаточная энергия приводов раскрытия для преодоления трения покоя.

7) Условие поворота штанги на заданный угол.

При выполнении данного условия отказ может произойти из-за невключения или сбоя в работе привода (невключение); отсутствия необходимых запасов движущего момента (торможение); исчезновения радиального зазора в шарнире вращения (запрессовка); исчезновения осевого зазора в шарнирном узле (заклинивание); возникновения внезапных препятствий на пути движения штанги (зацепление).

8) Условие фиксации штанги в рабочем положении.

Причина отказов – недостаточная энергия приводов для защелкивания фиксаторов конечного положения штанги; расфиксация конечного положения штанги при действии внешней нагрузки.

9) Условия обеспечения заданных параметров штанги в рабочем положении.

Причинами отказов при выполнении данного условия могут быть разрушения и деформации элементов конструкции штанги при мгновенном наложении механических связей в момент фиксации штанги; недостаточная жесткость штанги; наличие люфтов в шарнирах; недостаточная точность позиционирования штанги в рабочем положении; недостаточная точность формы рабочей поверхности оборудования, размещенного на штанге в течение срока активного существования; недостаточная локальная прочность элементов конструкции штанги при работе двигательной установки коррекции орбиты или ориентации аппарата.

Перечисленные условия можно разбить на группы по физическим принципам проявления [17, 3]:

- условия *конструкционной прочности* штанги на различных этапах ее функционирования (в момент, предшествующий развороту штанги в рабочее положение, при фиксации в конечном положении и т.п.),
- условия *временные* (недопустимость *преждевременной* расчеховки замка в стартовом положении штанги; обеспечение инициирования процесса раскрытия штанги *в заданный момент времени*; снятие кинематических связей штанги с опорным основанием *в заданный момент времени* и т. п.),
- условия *кинематические* (обеспечение свободы *вращения* в шарнире в любом угловом положении штанги и беспрепятственного *движения* штанги по заданной траектории и т. п.),
- условия *трибологические* (наличие разделительного смазывающего слоя в местах контактного взаимодействия подвижных узлов, стойкость смазки к истиранию при вибрационном воздействии нагрузок активного участка, стойкость смазки после проведения проверок функционирования механизмов раскрытия при наземных испытаниях и т. п.),
- условия *энергетические* (преодоление трения покоя в шарнире штанги при начальном страгивании и обеспечение энергетической достаточности для поворота штанги на полный угол разворота, в том числе для фиксации в рабочем положении и т. п.),
- условия *точности позиционирования* (отсутствие люфтов в шарнирах после установки в рабочее положение, отсутствие необратимых деформаций и разрушений, а также геометрических искажений вследствие процессов старения и т. п.).

Все эти условия завязаны строгой последовательностью или синхронностью выполнения. Для решения поставленной задачи необходимо выполнение всех девяти

условий с одинаковой, очень высокой вероятностью. При реализации успешного запуска все эти вероятности становятся равными единице.

Таким образом, рассматриваемая задача сводится к оценке *функциональной надежности* механизма одноразового действия, что гораздо сложнее обычного расчета надежности механической системы на прочность.

Представим теперь изложенную процедуру более подробно для случая оценки надежности процесса безошибочного поворота штанги (см. рисунок 3.9). Для этого рассмотрим алгоритмы построения допустимых областей (ДО) и функций предельных состояний (ФПС) для каждого из девяти видов отказа разворота штанги. Перед этим рассмотрим основные способы и специфику построения ДО в пространстве нагрузок, физико-механических и конструкционных параметров *конкретного запроектированного изделия*.

3.5 Особенности построения ФПС и ДО в рамках теории индивидуальной конструкционной надежности

Построение ФПС и ДО являются *определяющими этапами* оценки индивидуальной конструкционной надежности. При формулировке функций предельных состояний для *уже запроектированной* по существующим канонам конструкции используются уравнения и алгоритмы, связывающие ее параметрические свойства с нагрузками и воздействиями, для выполнения которых она создана. При этом предполагается, что проект конструкции удовлетворяет всем массогабаритным, стоимостным и функциональным требованиям ТЗ.

По записанной таким образом ФПС строится соответствующая ей ДО. Для этого необходимо решать соответствующие *обратные задачи* механики и тех разделов знаний, к которым относятся ее проектные функции. В контексте конструкционной надежности определяются такие величины нагрузок и воздействий, при которых в элементах системы возникают те или иные предельные состояния (пределы текучести, прочности, малоциклового прочностного состояния, многоциклового усталостного состояния, потеря устойчивости, выпучивание, предельно допустимые прогибы, деформации и т.п.). Здесь необходимо также рассматривать такие обобщенные характеристики изделия, как предельно допустимая жесткость и точность позиционирования (как отдельных узлов – шарниров, штанг, рефлекторов, так и УК в целом).

Кроме классической расчетной схемы «нагрузка–сопротивление» при комплексной оценке надежности космического аппарата необходимо использовать обобщенные варианты этой схемы, когда в роли нагрузки и сопротивления выступают некоторые параметры самой конструкции, опосредованно зависящие от внешних или внутренних нагрузок и воздействий. К таким случаям относятся все задачи, связанные с зазорами в шарнирах. Для решения такого типа задач необходимо использовать метод многокритериальной стохастической оптимизации многомерных систем.

Здесь отметим, что вопросы жесткости изделий прямым образом зависят от точности изготовления деталей и сборочных узлов. Эта задача впервые поставлена в [4, 16] и решена применительно к технологии изготовления и *оценке собираемости и начальной надежности* стальных строительных конструкций в работах [6, 10, 11]. Результаты этих исследований получили полную реализацию на Челябинском заводе металлических конструкций в 1978–1979 гг. и использованы при составлении Государственного стандарта СССР «Предельные отклонения геометрических параметров

стальных строительных конструкций» в 1986 г. Этот подход был также использован НИЦ УрО РАН при оценке собираемости конструкций атомных реакторов.

3.6 Технология применения методологии индивидуальной конструкционной надежности

При применении методологии индивидуальной конструкционной надежности используется следующая технология.

На *первом этапе* конструктор, руководствуясь утвержденным ТЗ и используя весь обязательный арсенал нормативных документов всех уровней на проектирование УК, свой личный опыт и видение, создает детерминированную версию объекта, все параметры которого известны.

На *втором этапе* для уже запроектированного объекта строятся функции предельных состояний с использованием всех известных расчетных предельных состояний для материалов (пределы текучести, прочности и т. п.), а также для элементов, узлов, агрегатов и системы в целом, беря их, в том числе, из утвержденного ТЗ на его проектирование.

На *третьем этапе* для каждой ФПС строится своя допустимая область в пространстве тех параметров функции предельных состояний, которые определяют качество функционирования элемента или системы в целом. При этом, в зависимости от качества исходной статистики, границы ДО могут быть детерминированными, представлять собой квантили или иметь свою ФПВ.

На *четвертом этапе* решается задача оценки вероятности выхода вектора качества элемента или системы в целом из своей(-их) ДО.

Второй и третий этапы оценки надежности УК с использованием *теории индивидуальной конструкционной надежности* являются *площадкой взаимодействия* конструктора и специалиста-расчетчика индивидуальной надежности, поскольку они могут синергетически дополнять друг друга, работая с одним и тем же материалом, но рассматривая его с разных, взаимодополняющих, точек зрения.

Для демонстрации возможностей методики индивидуальной конструкционной надежности ограничимся из-за недостатка места анализом выполнения *условия поворота штанги на заданный угол* [17, 18, 3]. Выбор данного условия обусловлен, с одной стороны, наличием природы отказов, которые позволяют в полной мере показать основные принципы получения *оценки индивидуальной конструкционной надежности*, с другой стороны, причины отказов, характеризующие невыполнение данного условия, являются универсальными, не зависящими от конструктивного исполнения поворотной штанги.

1. Отказ по типу «невключение привода». Этот тип отказа относится к структурной надежности. Отказ (внезапный, невосстанавливаемый) может быть вызван

поломкой привода на участке выведения УК на орбиту, например, из-за механического разрушения пружины раскрытия или нарушения электрических контактов электромеханического привода (мотор-редуктора) от вибраций на активном участке запуска. Обычно приводы имеют унифицированную модульную конструкцию и используются в однородных условиях внешнего воздействия. Поэтому для них возможно получение экспериментальной функции наработки

$$R_N = n / N, \quad (3.6.1)$$

где

n – число неотказавших приводов при наземной экспериментальной отработке и летной практике,

N – общее число приводов в выборке.

Условие надежности для привода с учетом (3.6.1) имеет вид

$$R_N > P_{lim}, \quad (3.6.2)$$

где

P_{lim} – вероятность безотказной работы привода в соответствии с заданным проектным требованием показателя надежности штанги.

В случае несоблюдения условия (3.6.2) требуемая надежность привода обеспечивается за счет m -й кратности дублирования его критичных элементов (структурного либо функционального) по формуле

$$R_d = 1 - (1 - R_N)^{m+1}. \quad (3.6.3)$$

2. Отказ по типу «торможение штанги». Этот отказ $Q(\tau)$ может возникнуть, если величина движущего момента $M_0(\tau)$ по каким-то причинам окажется меньше момента сил сопротивления $M_r(\tau)$:

$$Q(\tau) = \{ [M_0(\tau) - M_r(\tau)] < 0; 0 \leq \tau \leq t_0 \}, \quad (3.6.4)$$

где

t_0 – момент отказа.

В инженерной практике принято, чтобы условие $M_0 > M_r$ соблюдалось в любой точке траектории движения штанги при условии нулевой кинетической энергии. Визуализация этого процесса представлена на рисунке 3.10. В нем ФПС – плоскость $OO'B'B$, ДО – область $OABV'A'O'$ (верхний трехгранный параллелепипед), где отрезок OO' – расчетное время раскрытия штанги. Нижний трехгранный параллелепипед представляет область отказов.

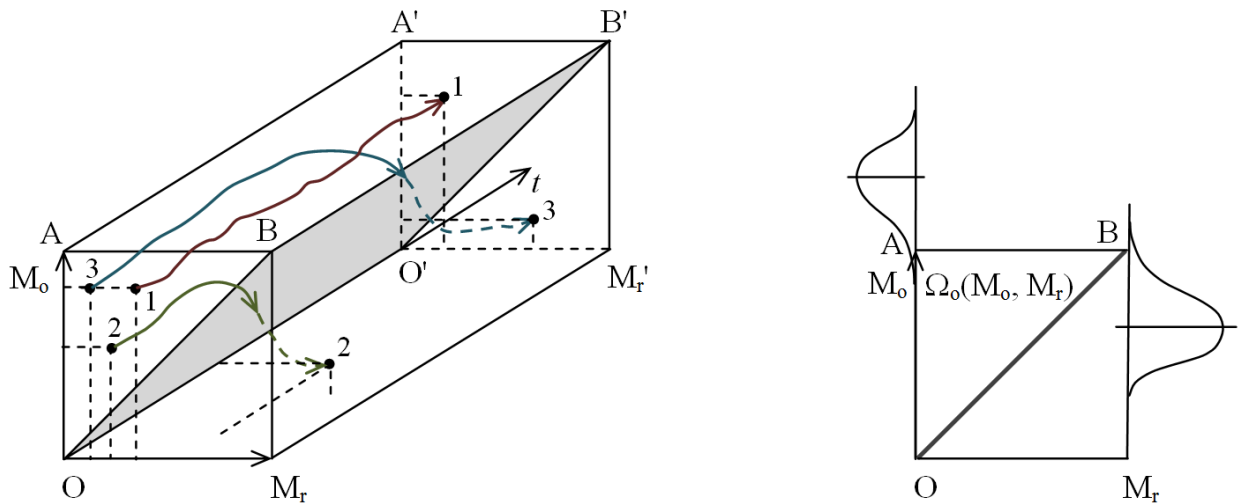


Рисунок 3.10 – Визуализация: успешного разворота штанги, левый рисунок (кривая 1); функционального отказа раскрытия штанги (кривые 2, 3); на правом рисунке – ФПВ движущего момента (вверху слева) и момента сил сопротивления (справа)

Задача конструктора состоит в том, чтобы за счет *практически абсолютно надежных* (многократно проверенных) конструктивно-технологических приемов обеспечить условие страгивания:

$$P[M_0(\tau) > M_r(\tau), \tau = 0] \rightarrow 1, 0, \quad (3.6.5)$$

и условие полного раскрытия:

$$\begin{aligned} P[M_0(\tau) > M_r(\tau), 0 < \tau < t_r] &\rightarrow 1, 0, \\ P[\varphi = \varphi_k | \tau = t_r] &\rightarrow 1, 0, \end{aligned} \quad (3.6.6)$$

где

t_r – время завершения разворота штанги.

Величина движущего момента $M_0(\tau)$ зависит от типа привода и его рабочих параметров. Для механических приводов (торсионов, пружин кручения, часовых пружин, пружин растяжения) движущий момент определяется следующими параметрами:

- размерами пружины (в общем случае диаметры проволоки и пружины, длина пружины),
- материалами пружины (параметрами прочности и жесткости),
- способом создания вращающего момента («чистым» вращением или парой сил; в последнем случае, например, если в качестве привода используется пружина растяжения, на значение движущего момента оказывает влияние плечо действия вектора силы, которое в общем случае имеет разброс за счет геометрического размера между точкой приложения силы и осью вращения и само по себе меняется в процессе движения поворотной конструкции),
- настройкой (установкой) пружины на начальный момент при сборке поворотной конструкции,
- углом раскрытия конструкции.

Все приведенные факторы определяются технологическими допусками.

В общем виде движущий момент для механического привода как функцию времени можно выразить формулой

$$M_0(\varphi, \tau) = f \left\{ \vartheta_p(T_{en}), \vartheta_c(T_{en}), \varphi(\tau), \tau \right\}, \quad (3.6.7)$$

где

ϑ_p – обобщенный конструктивный параметр пружины,

ϑ_c – обобщенные конструктивные характеристики пружины в сборке поворотной конструкции,

T_{en} – температура окружающей среды,

φ – угол поворота конструкции до момента фиксации (соприкосновения с фиксатором конечного положения поворотной конструкции).

Момент сил сопротивления на пути движения штанги определяется силами трения в шарнире и сопротивлением изгибу (кручения) жгута межпанельных кабелей (в общем случае электрических, слаботочных, коаксиальных).

В общем виде момент сил сопротивления $M_r(\tau)$ как функцию времени можно выразить формулой

$$M_r(\varphi, \tau) = f \left\{ N(\varphi), \mu(T_{en}), r, k[T_{en}, \nu, l, \varphi(\tau), \tau] \right\}, \quad (3.6.8)$$

где

N – поперечная сила, действующая на ось, которая определяется в зависимости от способа создания движущего момента,

μ – коэффициент трения скольжения в шарнире,

r – радиус шарнира; k – жесткость жгута кабеля (как правило, для снижения жесткости жгут кабеля в межпанельной зоне «распушают», т. е. создают возможность каждому проводу в жгуте деформироваться независимо),

ν – параметр, зависящий от положения жгута между неподвижными точками крепления по отношению к оси шарнира (обычно стремятся сделать промежуточную вращающуюся опору жгута соосной с осью вращения шарнира),

l – длина жгута между неподвижными точками крепления на конструкции.

Функция надежности осуществления поворота штанги в зависимости от угла с учетом (3.6.7) и (3.6.8) равна

$$R_0(\tau) = P\{[M_0(\varphi, \tau) - M_r(\varphi, \tau)] > 0; 0 \leq \varphi \leq \varphi_x; 0 \leq \tau \leq t_r\}. \quad (3.6.9)$$

Формула (3.6.9) использует модель надежности «нагрузка–сопротивление», в которой момент сил сопротивления M_r выступает как «нагрузка», а движущий момент M_0 является «сопротивлением». Допустимой областью является область значений движущих моментов M_0 , развиваемых приводом на угле поворота штанги, больших чем M_r во все моменты времени $0 \leq \tau \leq t_r$ (см. рисунок 3.9).

Для вычисления $R_0(\tau)$ необходимо уметь строить случайные функции (СФ) M_0 и M_r (или знать их характеристики – математическое ожидание, дисперсию, корреляционную функцию, спектральную плотность) или построить ее ФПВ, если они представлены в виде случайных величин (СВ). Это требует применения аппарата статистической динамики и теории случайных функций.

Значения параметров в формулах (3.6.7) и (3.6.8) могут быть получены с помощью измерений величин движущих моментов и моментов сил сопротивления при проведении наземной экспериментальной отработки с учетом имитации тепловых условий космического пространства [3, 13].

3. Отказ по типу «запрессовка шарнира». Отказ (внезапный, восстанавливаемый или невосстанавливаемый) может быть вызван внезапным исчезновением радиального зазора в шарнире за счет изменения толщины слоя твердого смазывающего покрытия и

температурных деформаций (рисунок 3.6.2). Условие работоспособности по радиальному зазору определяется формулой

$$\Delta_0(\tau, T) = \delta(\tau, T) - 2\delta_n(\tau, T) - \delta_{pr}(\tau, T) > 0; 0 \leq \tau \leq t_3, \quad (3.6.10)$$

где

Δ_0 – радиальный зазор в шарнире,

δ – минимальный расчетный зазор в сопряжении между охватываемой и охватывающей деталями шарнира без учета слоя смазки между ними,

$\delta_n(\tau)$ – максимальная толщина твердой смазки с учетом ее возможных изменений в процессе эксплуатации от притирания и температуры,

δ_{pr} – максимальное значение тепловых деформаций конструктивных элементов шарнира в радиальном зазоре при объемном расширении (сжатии) охватываемой (охватывающей) детали,

T – температура в сопряжении деталей шарнира,

t_3 – время (продолжительность) эксплуатации.

Из формулы (3.6.10) следует, что надежность штанги по радиальному зазору в шарнире тоже можно рассчитывать, используя модель «нагрузка–сопротивление», если под *нагрузкой* понимать меняющиеся во времени параметры радиального зазора δ_r вследствие возможных изменений размеров сопрягаемых деталей в процессе эксплуатации УК из-за тепловых деформаций $\delta_r = 2\delta_n + \delta_{pr}$, а под *сопротивлением* – параметр δ , противостоящий изменению нагрузки. В этом случае функцию надежности по условию сохранения ненулевого радиального зазора в подшипнике с учетом приведенных выше выражений δ и δ_r можно представить формулой

$$R_r(\tau) = P\{[\delta(\tau, T) - \delta_r(\tau, T)] > 0; 0 \leq \tau \leq t_3\}. \quad (3.6.11)$$

Допустимой областью в пространстве качества в случае запрессовки шарнира является область изменений начального (проектного) зазора Δ_0 (см. рис. 3.6.2).

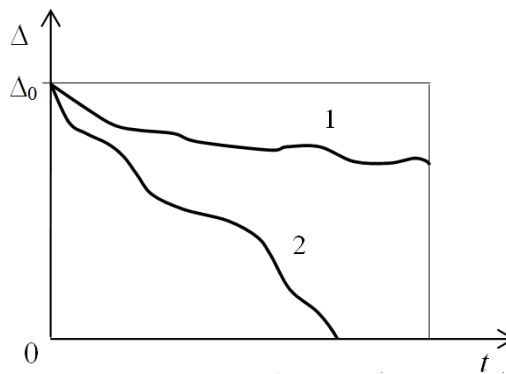


Рисунок 3.11 – Изменение радиального зазора Δ :
 1 – работоспособный шарнир, 2 – отказавший (запрессованный) шарнир

Следует отметить, что условие надежности (3.6.11) означает, что в течение всего срока службы УК его суммарное температурное поле не должно быть способным сделать первоначальный проектный зазор меньшим, чем зазор $\delta_r(\tau, T)$.

Значения параметров радиального зазора как случайной функции времени и температуры для оценки надежности могут быть получены в результате расчетов размерных цепей (для параметра δ), проведения измерений толщины слоя твердой смазки и использования конструкционных ограничений (для параметра δ_n), а также расчетов температурных деформаций (для параметра δ_{pr}) [3].

4. Отказ по типу «заклинивание в шарнирном узле». Этот вид отказа (внезапный, восстанавливаемый или невосстанавливаемый) может быть вызван исчезновением осевого зазора в шарнирном узле за счет температурных деформаций. Условие работоспособности по осевому зазору определяется формулой

$$\Delta_{sh}(\tau, T) > \Delta l(\tau, T), \quad (3.6.12)$$

где

Δ_{sh} – фактический осевой зазор в шарнирном узле, рассматриваемый как проектная (квази)детерминированная величина, которая всегда должна быть больше нуля,

Δl – тепловая деформация как случайная функция температуры и времени, способная вызвать распорные усилия в конструкции шарнирного узла в случае, если $\Delta_{sh} < \Delta l$.

Тепловая деформация определяется по формуле

$$\Delta l = l \cdot \varepsilon, \quad (3.6.13)$$

где

$$\varepsilon = \Delta t(\alpha_1 - \alpha_2),$$

l – расстояние между шарнирами,

ε – относительное удлинение между шарнирами,

Δt – расчетная разница температур между рабочей температурой в условиях космоса и температурой сборки штанги на заводе-изготовителе,

α_1, α_2 – коэффициенты линейного температурного расширения материала штанги и корпуса УК.

Как следует из формулы (3.6.12), надежность штанги по осевому зазору в шарнирном узле также подчиняется модели «нагрузка–сопротивление», если под *нагрузкой* понимать меняющиеся параметры осевого зазора вследствие тепловых деформаций Δl , а под сопротивлением – параметр Δ_{sh} , противостоящий изменению нагрузки. В этом случае функцию надежности по условию сохранения осевого зазора с учетом (3.3.17) и (3.3.11) можно представить выражением

$$R_{sh}(\tau) = P\left\{\left[\Delta_{sh}(\tau, T) - \Delta l(\tau, T)\right] > 0; 0 \leq \tau \leq t_s\right\}. \quad (3.6.14)$$

Допустимой областью для случая заклинивания в шарнирном узле является одномерное пространство зазора Δ_{sh} в виде от нулевого отрезка на оси абсцисс, равного по величине проектному зазору.

Изменения величины осевого зазора во времени для расчета надежности (3.6.14) могут быть получены в результате расчетов размерных цепей как функций температуры (для параметра Δ_{sh}) и температурных деформаций (для параметра Δl) (3.6.13). Здесь мы имеем случай, когда величина зазора Δ_{sh} сама является квазислучайной величиной, зависящей от температуры, которая всегда должна быть больше Δl .

Следует заметить, что отказы по типу «запрессовка шарнира» и «заклинивание в шарнирном узле» наиболее часто встречаются при раскрытии конструкций УК и в зарубежной практике объединяются в отказы типа «потеря зазоров». Как следует из отчета Aerospace Corporation за 2008 г., анализы аномальных инцидентов с подвижными механическими узлами космических аппаратов показали, что из 164 наземных и 24 орбитальных случаев отказов большинство из них (до 47 % от общего числа) были связаны именно с «потерей зазоров» [14].

5. Отказ по типу «зацепление штанги». Такой отказ (внезапный, невосстанавливаемый) может быть вызван возникновением случайных непредвиденных помех на пути движения штанги, вызванных неучтенными условиями невесомости, вибрации, кинематикой движения или неудачной компоновкой смежных конструкций, а также неправильными действиями и грубыми ошибками рабочих-монтажников изделия. Отказы этого типа всегда неожиданны, и являются следствием отсутствия алгоритма проверки изделия, готового к отправке на пусковой стол, на его готовность к раскрытию на орбите. Тем не менее, практическая космонавтика периодически сталкивается с подобными отказами. Например, на космическом корабле «Союз-1» произошло зацепление одного из крыльев солнечной батареи за маты экранно-вакуумной теплоизоляции, на автоматическом УК «Telstar 14R» попадание в механизм раскрытия ослабшего жгута электрокабеля также привело к неполному разворачиванию крыла солнечной батареи [3].

Алгоритм выявления подобного рода отказов предполагает построение полной группы последовательностей проверок действий по подготовке УК к безупречному раскрытию на орбите. Расчет надежности штанги по этому критерию не подпадает под схему «нагрузка–сопротивление». Эту надежность можно оценить за счет построения, по возможности, *полной группы «событий–проверок»* с последующим компьютерным моделированием этих цепочек на предмет вероятности упущения какой-либо проверки и оценке ее последствий. Для реализации этого подхода необходимо иметь статистические данные о вероятности человеческих ошибок рабочих-монтажников.

Часто приходится компоновать УК так, что трехмерные зоны беспрепятственного раскрытия конструкций образуют узкий коридор. Здесь для обеспечения надежности раскрытия необходимо использовать схемы организованного движения, которые бы позволили исключить зацепления с учетом случайных разбросов траекторий движения. В этом случае используют устройства для синхронизации движения, но всегда нужно убедиться, что в данном случае зацепление не произойдет. Оценку успешности раскрытия можно получить путем многократного компьютерного моделирования этих траекторий с учетом поведения межпанельных кабелей, которые при вибрациях или под действием невесомости могут попасть в механизм раскрытия.

В общем случае, смыслом всех процедур по исключению отказа типа «зацепление» является оценка вероятности выполнения условия

$$Q_{st} \rightarrow 0,$$

где

Q_{st} – вероятность зацепления штанги.

Надежность по незацеплению определяется выражением

$$R_{st}(t) = 1 - Q_{st}. \quad (3.6.15)$$

Таким образом, с учетом (3.6.3), (3.6.9), (3.6.11), (3.6.14) и (3.6.15) надежность выполнения условия поворота штанги на заданный угол при выполнении процедур методики индивидуальной конструкционной надежности может быть вычислена по формуле (3.3.3) и, в случае независимости отказов, путем перемножения вероятностей:

$$R(t) = R_d R_0(t) R_r(t) R_{sh}(t) R_{st}(t). \quad (3.6.16)$$

Для оценки полной надежности поворота штанги следует вычислить надежность выполнения каждого из девяти условий поворота штанги и общую надежность по формуле (3.3.3) или методом структурной надежности.

3.7 Общий алгоритм применения процедуры оценки индивидуальной конструкционной надежности УК на этапе его эксплуатации

Проблема оценки надежности успешно запущенного на орбиту уникального спутника представляет собой более сложную задачу, чем обеспечение функциональной надежности запуска УК и его развертывания, поскольку требует знания стохастических характеристик всех основных деградационных процессов как функций времени, произошедших во время всех циклов существования УК (до, во время и после запуска космического аппарата на орбиту) во всех его структурных компонентах.

Точность и жесткость консольных конструкций в рабочем положении обеспечиваются жесткостью и стабильностью размеров углепластиковых элементов конструкций УК и стабильностью их взаиморасположения в шарнирах. Разработка и изготовление одноразовых крупногабаритных космических конструкций осуществляется на предприятиях с индивидуальными особенностями технологических процессов, имеющих повторяющиеся характеристики при производстве однотипных изделий. Это позволяет использовать подход, основанный на концепции и расчетах индивидуальной надежности [4–8, 10–12].

В рамках этого подхода необходимо выполнить следующие процедуры:

- записать ФПС для каждого элемента конструкции и УК в целом для всех возможных видов отказа,
- формализовать количественные условия надежности (или отказа) для каждой ФПС,
- записать общее условие функциональной надежности изделия в целом,
- представить все участвующие в расчетах свойства используемых в рассматриваемых изделиях материалов в виде детерминированных величин, СВ или СФ времени, используя для этого всю доступную информацию, оценить количественные значения их параметров и уровень достоверности этих значений,
- построить количественные модели всех нагрузок и воздействий на консольную конструкцию (в виде веерных процессов, линий регрессии, марковских процессов чистой гибели/рождения и диффузионных марковских процессов, процессов Леви и др.) и найти количественные значения ее параметров, оценить уровень достоверности этих значений,

- для тех параметров свойств материалов, нагрузок и воздействий, у которых в настоящее время статистическая база скудна, использовать нетрадиционные методы теории вероятности и математической статистики (байесовский подход, бутстреп, метод перевыборки, интервальные оценки, нечеткую логику, нейронные сети, генетические алгоритмы и т. п.),
- найти статистические показатели заводской точности изготовления каждого элемента УК (погрешности) и стапельной собираемости каждого узла и системы в целом. Для этого необходимо провести соответствующие массовые измерения после каждого передела исходных полуфабрикатов, элементов и сборки всего единичного изделия,
- получить статистические характеристики воспроизводимости и повторяемости измерений и выполнения технологических операций, что позволит оценить качество как технологии изготовления и сборки, так и качество/надежность человеческого фактора (токаря, фрезеровщика, слесаря, сборщика, диагноста, управленцев и др.),
- построить допустимые области в пространстве нагрузок, воздействий и критичных параметров изделия для каждого элемента и системы в целом с учетом возможной деградации свойств и параметров консольных конструкций,
- используя формулы из [4–8, 10–12], найти вероятности пребывания вектора статических, динамических нагрузок и кинематических воздействий и функциональных параметров изделия в допустимой области по всем критичным элементам, системы в целом и всем возможным видам ее отказа,
- для оценки надежности различных комплектующих массового изготовления, входящих в состав УК, можно использовать методы ускоренных испытаний на надежность, подобно тому, как это делается для авиационных двигателей [15],
- оценить уровень надежности, который фактически закладывается в создаваемую уникальную конструкцию при использовании существующих норм, правил и конструкторско-технологических приемов проектировщика,
- сопоставить полученные результаты с заданными требованиями на проектирование в ТЗ и в случае несоответствия изменить конструкцию и сделать итерационный перерасчет системы до безусловного выполнения задания.

3.8 Выводы к разделу 3

Единственный путь к обеспечению высокой надежности уникальных УК состоит в поднятии на следующий уровень технологии их проектирования, изготовления и отладки, используя методологию высокоточного расчета индивидуальной конструкционной надежности (на основе статистики, собранной в новых технологических условиях), для анализа и синтеза его надежности.

Представляется, что *первоочередными задачами* практической теории индивидуальной конструкционной надежности УК являются:

- 1) построение моделей нагрузок, воздействий и физико-механических свойств материалов и конструкций УК как случайных функций/процессов (СФ) времени или СВ,
- 2) построение корректных и адекватных ФПС и ДО для типовых отказов УК и его критичных компонент,
- 3) оценка начальной надежности УК $R(0)$ и ее эволюции $R(t)$ на всех последующих циклах существования аппарата,
- 4) организационные мероприятия для реализации данного проекта,
- 5) выявление «врожденного уровня надежности», стихийно заложенного в существующие нормы расчета и проектирования УК при из разработке (для *независимого подтверждения приемлемости* конструкторско-технологического подхода к проектированию высоконадежных УК) [17, 18, 3],
- 6) разработка практической орбитальной диагностики и мониторинга,
- 7) оценка живучести УК при их отладке и эксплуатации,
- 8) применение описанной выше методологии индивидуальной конструкционной надежности для обеспечения безынцидентного развертывания УК и численного подтверждения необходимого высокого уровня надежности при его проектировании.

4 Математическая модель анализа и оценки надежности локальных и автономных ЭЭС с распределенной генерацией (в том числе, с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) – солнечными батареями, ветрогенераторами и др.) применительно к условиям арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ)

4.1 Гибридные энергетические объекты (ГЭО) арктической зоны РФ

Проблема надежности и безопасности ЭЭС в мире всегда была актуальной, поскольку они постоянно развиваются, особенно в последнее время в связи с проникновением в их структуру цифровизации и искусственного интеллекта, что кардинально изменяет условия их функционирования (в особенности, на стадии их ремонта). Развитие ЭЭС сопровождается повышением их сложности и большей структурной и функциональной связностью составляющих частей и элементов. Расширяется множество состояний ЭЭС, которые могут привести к крупным системным авариям. После того как *зеленая экономика и индустрия* вывела на рынок множество *автономных установок*, преобразующих энергию солнца, ветра, биомассы, морских приливов-отливов и т.п., при их практическом использовании и интеграции с существующими ЭЭС возникли проблемы 1) согласования их циклической или сезонной работы со стационарным непрерывным функционированием существующих энергетических сетей и 2) хранением вырабатываемой ими энергии, которую нельзя сиюминутно использовать локально или с передачей в централизованные электрические сети. Дополнительные проблемы обеспечения надежности и безопасности этих гибридных локальных энергетических систем (ГЛЭС) возникают в силу специфики арктических территорий.

Проблемы надежности и безопасности электро- и энергоснабжения арктических потребителей существенно важнее, чем для обычных потребителей, в связи с повышенной опасностью последствий потери энергии, необходимой для жизнеобеспечения населения и бесперебойной эксплуатации объектов энергетики в исключительно суровом климате. Фактически, здесь речь идет об энергетической безопасности арктического населения.

Большинство параметров климата и окружающей среды являются случайными величинами или функциями времени и/ или географических координат и имеют неопределенный характер, не позволяющий их адекватное описание существующими математическими методами. Серия крупнейших системных аварий в середине 80-х годов в ряде западных ЭЭС (США и Канада, ЕС, Франция, Бельгия, Швеция и др.), где каждое из исходных событий, приведших к аварии, имело вероятность не более 10^{-9} , заставила

электроэнергетиков обратить более серьезное внимание на маловероятные события типа «черный лебедь». С увеличением числа элементов в системе (согласно биномиальному распределению) происходит сдвиг максимума вероятности в сторону многократных (трехкратных и более) отказов [1]. Неавтоматизированный анализ состояний ЭЭС становится просто невыносимым [2]. В ответ на эту проблему возникла теория отказов ЭЭС типа «черный лебедь».

В настоящее время выбор оптимального варианта схемы электроснабжения производится, как правило, по минимуму расчетных затрат, в которые входит математическое ожидание (МО) ущерба от перерыва электроснабжения потребителей [3–7] по критерию национального дохода. Однако в ряде работ [8, 9] утверждается, что из-за существования потребителей с *непредсказуемым характером последствий перерывов* невозможно сколь-нибудь точно оценить этот ущерб, и этот метод неприменим. Теоретически этот подход можно использовать, когда дисперсия ущерба и других случайных составляющих затрат *имеют один и тот же порядок* величин. На практике это никогда не выполняется.

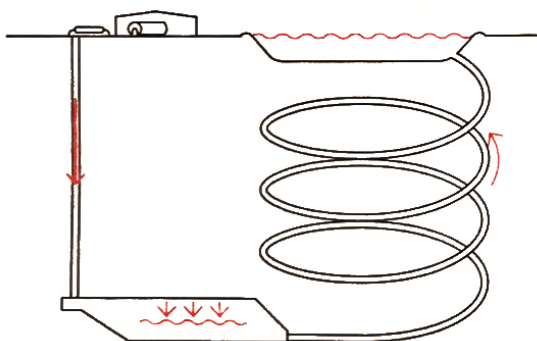
Другим направлением теории надежности ЭЭС является *разработка и обоснование нормативов надежности* электроснабжения элементов ЭЭС, отдельных потребителей [10–12], узлов нагрузки ЭЭС, систем и их объединений в целом [11, 13, 14].

При решении вопросов обеспечения режимной работы объектов энергетики арктической зоны могут быть использованы оба подхода, но при учете специфики АЗРФ.

4.2 Перспективные накопители энергии для ВИЭ

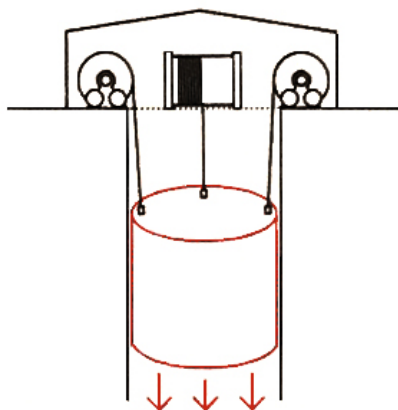
Одним из важных, но все еще не решенных вопросов эффективного применения развития микрогрид является отсутствие эффективных способов хранения выработанной, но не востребованной электроэнергии от возобновляемых источников. В настоящее время наибольшее распространение получили два способа: литий-ионные батареи и маховики. Первые нашли применение в индустрии в качестве основных и резервных батарей на воздушных судах, других транспортных устройствах, а также в производстве сотовых телефонов, планшетов, ноутбуков и пр. Маховики применяются в автобусах. Эти устройства не покрывают всю область возможного применения аккумуляторов электричества. Даже лучшие литий-ионные батареи «фонят» при хранении большого количества электроэнергии, которое способна вырабатывать массивная ветровая или солнечная установка с временем хранения в лучшем случае, около 4-х часов. В связи с этим приведем краткое описание пяти новых потенциально менее дорогостоящих технологий сохранения электрической энергии, когда она сохраняется в качестве потенциальной в других формах для эффективного использования возобновляемой энергии, которые в настоящее время находятся в стадии опытного применения.

1. Аккумулятор на сжатом воздухе.



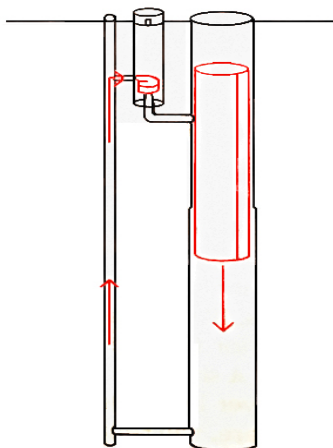
Вырабатываемая энергия используется для сжатия воздуха, который перекачивается в подземное хранилище, при этом столб воды удерживает его сжатым. Снижая давление, воздух декомпрессируется, высвобождая свою энергию для привода турбин на поверхности в течение 24 часов и более. У фирмы Hydrostor Inc. (Торонто, Канада) есть два демонстрационных завода в Канаде. Сооружения планируются для поставки в США, Чили и Австралии.

2. Мини шахты



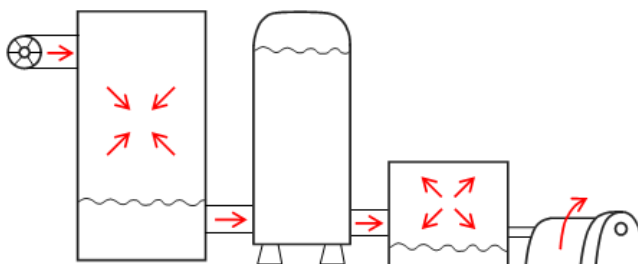
Компания Edinburgh'S Gravitricity Ltd (Великобритании) сохраняет гравитационную энергию, используя энергию от возобновляемых источников, для поднятия массы весом до 3000 тонн в шахтном стволе. Позволяя массе падать, высвобождается энергия, достаточная для генерирования электроэнергии, которой достаточно в течение восьми часов. Лебедки и кабели системы имеют срок службы 50 лет или более.

3. Вода под давлением



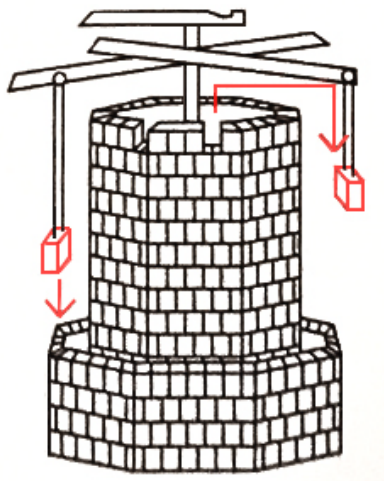
Компания Gravity Power LLC (Голета, Калифорния) планирует хранить энергию за счет поднятия каменно-бетонного поршня весом до 4000 тонн, находящегося в стальном кожухе, путем нагнетания насосом гидравлической жидкости под поршень. Снятие давления высвобождает накопленную энергию для привода турбины, которая генерирует электричество в течение максимум 16 часов.

4. Жидкий воздух



Фирма London's Highview Power питает накапливаемую ветровую и солнечную электрическую энергию в набор покупаемых на рынке готовых компонент для сжижения воздуха, охлаждая его. Чтобы использовать накопленную энергию, Highview расширяет жидкость нагревая ее, чтобы управлять турбинами, которые затем генерируют электричество в течение не менее 12 часов.

5. Гравитационная установка



Energy Vault в Лугано, Швейцария, планирует использовать роботизированный кран для укладки тысяч 38-тонных блоков в башню высотой до 150 м. Это, по сути, более сложная версия гравитационной модели: движущаяся масса блоков вращает генераторы производя электрическую энергии, когда кран отрывает их от башни и опускает на землю. Фирма утверждает, что система может обеспечить до 80 мегаватт-часов мощности, этого достаточно для покрытия нужд примерно 60 000 домов в течение 16 часов. Первый коммерческий блок компании будет построен под Миланом в 2019 г. в партнерстве с итальянской энергетической компанией Enel Group.

Очевидно, что не все из перечисленных средств найдут применение в условиях АЗРФ.

4.3 Вероятностное эквивалентирование при расчетах структурной надежности ЭЭС

В качестве примера рассматривается задача расчета показателей структурной надежности (ПСН) электроэнергетических системы (ЭЭС) с отказами элементов типа «обрыв» [15]. В качестве основной принята процедура исключения – восстановления узлов расчетной схемы, которая лишь в малой степени отличается от электрической схемы. Основным инструментарием преобразования расчетных схем является вероятностное эквивалентирование участков схемы с показателями надежности (ПН) элементов, зависящими от направления потоков энергии. Показано, что основным источником отличия расчетных показателей, полученных разными программными комплексами является методологическое различие вероятностного эквивалентирования электрически последовательных структур. Сравниваются «р» и «γ» – эквивалентирования. С учетом специфики ЭЭС в практических расчетах надежности электроснабжения узлов нагрузки предлагается использовать «γ – эквивалентирование». Также рассматривается использование методики «ромб–эквивалентирования» на этапе восстановления узлов ранга 2. Данная методика основана на параллельном подходе к расчету ПСН, который позволяет значительно повысить быстродействие расчетной процедуры.

В инженерной практике до сих пор не существует двух программных комплексов (ПК), которые бы во всех случаях показывали одинаковые результаты. Неполный учет совокупности возможных вероятностных событий приводит к завышенным, существенно отличающимся от статистических данных, показателям надежности. Отсюда – недоверие к существующим ПК. Реально анализ надежности ограничивается простейшими критериями, известными задолго до появления теории надежности – проверка относительно небольшого числа наиболее значимых (по мнению специалиста) аварийных состояний ЭЭС.

Отсутствие эталона для проверки результатов расчета в основном определяется размерностью и свойствами ЭЭС. По числу и разнообразию составных элементов ЭЭС является самой большой известной технической системой. Отсюда, даже при современном развитии вычислительной техники совершенно нереальным представляется просмотр всех состояний системы, где каждый элемент рассматривается в виде логической переменной с дискретным числом состояний [16]. Неизбежны допущения и ограничения, приводящие к появлению погрешностей.

Частично проблема размерности решается путем снижения числа расчетных

элементов за счет эквивалентирования отдельных участков ЭЭС. Связанные выполнением некоторой локальной задачи элементы могут и должны объединяться в группы. При этом группа может быть представлена как элемент. Процедура эквивалентирования присутствует при определении ПН практически всех упрощенных структур (последовательно-параллельные, «мостик» и др.). Однако эквивалентирование может быть использовано не только как инструментарий, но и как самостоятельное направление анализа надежности сложных структур, которое в [17] определено как вероятностное эквивалентирование (ВЭ), и на основе которого разработан ПК «СТРУНА». Данный ПК показал достаточно высокую эффективность и нашел свое применение в ряде проектных организаций. Развитие ПК шло по пути увеличения точности результирующих данных и расширения числа учитываемых состояний, характерных для электрических систем (направленность потоков энергии, учет действий автоматики, учет отказов типа «КЗ» и др.). При этом проявился основной источник погрешностей и отличия результатов – методологическое несоответствие расчетных процедур, определяемое выбранной системой ограничений и допущений.

В данном параграфе рассматриваются основные аспекты ВЭ при расчете ПСН сложных ЭЭС с отказами типа «обрыв», под которыми понимаются отказы, с последующим восстановительным ремонтом отказавшего элемента, вследствие чего происходит разрыв электрической цепи по месту элемента на время его восстановления.

Основные структуры и ПН ЭЭС. Для расчета ПСН, как правило, вводятся следующие допущения и ограничения: отказы элементов независимы; длительности безотказной работы и восстановления элементов описываются экспоненциальными законами распределения; поток отказов элементов считается стационарным; расчетная схема имеет монотонную структуру; все источники питания (ИП) объединяются в единый узел расчетного графа [18, 19].

В качестве результирующих показателей СН рассматриваются вероятности и интенсивности отказов узлов, средние длительности восстановления, коэффициенты готовности (КГ) и неготовности (КН) и ряд других показателей, производных от вышеперечисленных.

Расчетная схема. При эквивалентировании отдельных схем соединения элементов ЭЭС присутствует наиболее значимый, наиболее неопределенный и наименее формализованный участок – разработка расчетной (приемлемой для определения ПСН ЭЭС) схемы (РСх). Как правило, исследователи конструируют свою, отличающуюся от всех остальных РСх. Чаще всего отличие РСх определяется совокупностью учитываемых электрических свойств ЭЭС (одновременные отказы элементов, действия автоматики и

релейной защиты и др.). Наиболее значимым отличием является полный или частичный учет или неучет отказов типа «КЗ» (ОТКЗ). Данные отказы характеризуются тем, что перерыв электроснабжения осуществляется на время оперативных отключений (0,5–1 ч). ОТКЗ, практически не влияя на вероятность, отражаются на частоте и интенсивностях отказов электроснабжения. Существует два подхода по учету ОТКЗ – в виде отдельного направления СН [17] и в рамках единого расчетного процесса [20–22]. В результате неизбежно существенное отличие РСх, а следовательно, и отличие результирующих ПСН.

Проблеме формирования РСх посвящено достаточно много работ, например, [20, 21]. В них просматривается общая тенденция – ориентация на принципиальную электрическую схему (ЭСх), с адаптацией РСх к рассматриваемой задаче и конкретному узлу электроснабжения. В частности, узлами РСх являются узлы ЭСх (нагрузки, генерации, электрического соединения элементов и др.), а связями – элементы ЭСх, по которым энергия передается от ИП к узлам нагрузки (линии электропередачи, трансформаторы, выключатели, разъединители, трансформаторы тока и др.). Дополнительно, с целью учета тех или иных характерных свойств надежности ЭЭС, вводятся фиктивные узлы и связи (узлы, отражающие одновременный отказ нескольких узлов нагрузки, узел единой генерации, связи, соединяющие фиктивные узлы с иными узлами и др.).

Направленность потоков мощности. Некоторые элементы ЭСх характеризуются тем, что поток электроэнергии преимущественно направлен в одну сторону (например, ЛЭП постоянного тока или понижающий трансформатор, который не предполагается использовать в реверсивном режиме). Отказы таких элементов оказывают влияние на надежность лишь тех узлов, которые расположены на пути электроснабжения за отказавшими элементами. Поэтому в РСх подобные элементы должны быть представлены ориентированными ребрами. Игнорирование направленности энергетических потоков приводит к существенному завышению ПСН.

Последовательная цепь восстанавливаемой системы. Последовательная цепь (ПЦ) электрической сети (каждый промежуточный узел связан только с двумя соседними узлами и транзит мощности осуществляется от одного конечного узла к другому) в силу своего широкого применения является одной из наиболее значимых при эквивалентных вероятностных преобразованиях.

В ЭЭС, как правило, имеются узлы, ПСН которых не представляют интереса и которые могут быть выведены из расчетного процесса через эквивалентирование участка схемы. Чаще всего такие узлы входят в состав последовательных электрических цепей (выключатель, разъединитель, линия электропередачи, разъединитель, выключатель), где

при отказе одного элемента отключается вся последовательная цепь. С целью сокращения размерности РСх до начала расчетной процедуры такие цепи целесообразно представлять одной эквивалентной связью, т. е. этапу непосредственных расчетов ПСН должен предшествовать (и, как правило, реализуется во всех ПК) этап начального преобразования РСх. В то же время преобразование ПС присутствует не только на начальном, но и на всех этапах расчетного процесса.

На этапе эквивалентирования ПЦ возможно методологическое несогласование математических процедур. Чаще всего здесь реализуется принцип произведения вероятностей безотказной работы последовательных элементов $p_e = \prod p_i$, являющийся отражением логической операции конъюнкции работоспособных состояний элементов ПЦ, $s = \bigwedge x_i$ (см. рисунок 4.1). Однако такой подход (условно называемый далее как «р-метод») предусматривает возможность одновременного отказа нескольких последовательных элементов, что не соответствует технологическому принципу ПЦ в электроэнергетической системе (при отказе одного элемента отключается вся цепь и отказ второго элемента становится невозможным).

Для восстанавливаемой системы альтернативой является суммирование $\gamma_e = \sum \gamma_i$ параметров $\gamma_i = \lambda_i / \mu_i$ [17, 23], где λ_i, μ_i – интенсивности соответственно отказов и восстановлений элемента i (« γ -метод»). Данный подход является отражением процесса отказов, характеризуемого диаграммой состояний (см. рисунок 4.2).

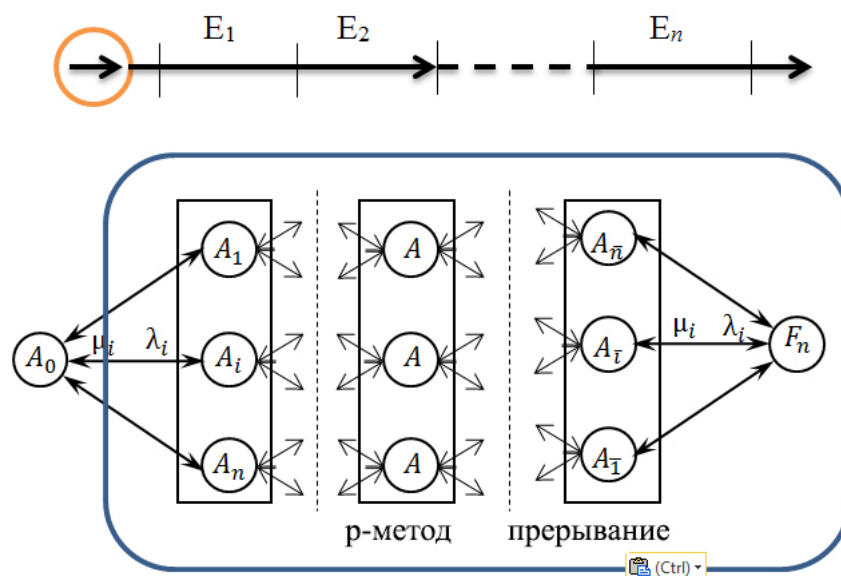


Рисунок 4.1 – Полная диаграмма состояний последовательной цепи

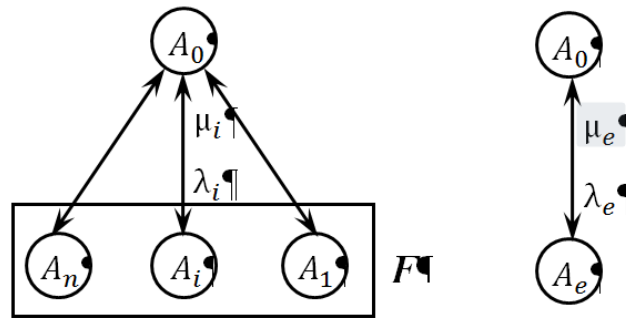


Рисунок 4.2 – Диаграмма состояний последовательной цепи из восстанавливаемых элементов

Согласно диаграмме, вероятность отказа элемента i при работоспособном состоянии остальных элементов $P_i = \gamma_i P_0$. Отсюда $P_0 = 1/(1 + \gamma_e) = 1/(1 + \sum \gamma_i)$. Отличие в результатах «р» и «γ» методах может составлять несколько десятков процентов. Действительно, пусть при двух элементах ПЦ $p_i = p = 0,5$. Соответствующие $\gamma_i = (1 - p)/p = 1$. В «р-методе» $p_s = 0,5^2 = 0,25$, а в «γ-методе» $p_s = 1/(1 + 1 + 1) = 0,33$. Разница составляет 33%, увеличиваясь по мере увеличения вероятностей отказов элементов. На рисунке 4.3а показана функциональная зависимость погрешности «р-метода» от числа и КН однотипных элементов ПЦ в зоне реальных КГ. Нетрудно видеть, что погрешность «р-метода» растет с увеличением числа последовательных элементов.

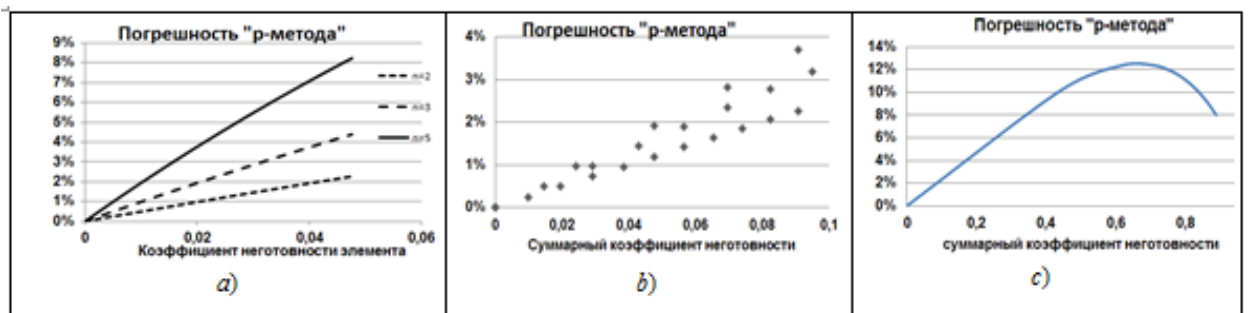


Рисунок 4.3 – Погрешность «р-метода»:
a – при разном числе последовательных элементов, *b* – вариация для суммарного коэффициента неготовности, *c* – в широком диапазоне при $n = 2$

Метод минимальных сечений (ММС) является одним из достаточно глубоко проработанным и успешно применяемым для анализа СН электрических систем [16, 19, 22–24 и др.]. Здесь ненадежность системы определяется как дизъюнкция минимальных сечений (МС). Известны положительные и отрицательные стороны ММС. К числу

положительных следует отнести наглядность метода и возможность его практического применения (через одно- или двухэлементные МС) для инженерной оценки ненадежности системы. Из отрицательных сторон необходимо отметить трудности с формированием полного множества МС и чрезвычайно больших проблем с расчетом вероятности дизъюнкции МС с общими элементами для ЭЭС большой размерности. Это зачастую заставляет ограничивать множество МС [25], что, безусловно, вносит дополнительную методологическую погрешность.

ММС во многом отражает специфику последовательной структуры. Действительно, для радиальной ПЦ системы электроснабжения из двух элементов $\{x_1, x_2\}$ можно указать два МС $\{s_1 = \bar{x}_1, s_2 = \bar{x}_2\}$ с соответствующими вероятностями отказа $\{q_1, q_2\}$. При этом вероятность отказа системы ($s = s_1 \vee s_2$):

$$P(s) = P(s_1) + P(s_2) - P(s_1 s_2) = q_1 + q_2 - q_1 q_2.$$

Данная формула является отражением «р-метода» ПЦ. Отсюда ММС имеет присущие «р-методу» погрешности. Здесь также допускаются реализации двух и более МС, что зачастую технологически недопустимо для ЭЭС. Дополнительно в ММС затруднен учет частоты (или интенсивности) отказов, что вызывает новые проблемы с применением ММС.

Вероятностное преобразование структур типа «мостик». Известно, что ВП расчетных схем реальных технических систем, как правило, не сводятся к последовательно-параллельным структурам. Одной из наиболее распространенных конечных схем в системах электроснабжения является структура типа «мостик» [16, 19]. Достаточно эффективной алгоритмической процедурой здесь является декомпозиция расчетной схемы на две – «с замыканием» и «с отключением» выбранного для декомпозиции элемента (ДЭ). Однако данная процедура может стать источником методологических погрешностей результирующих ПН. Как правило, при декомпозиции используется вероятностный подход – ПН первой схемы взвешиваются с вероятностью безотказной работы, а второй – с вероятностью отказа ДЭ. При этом в результирующих показателях не учитывается интенсивность отказа ДЭ, что является явным источником погрешности расчетов. Альтернативой является «гамма-декомпозиция», где результирующие ПСН определяются согласно вспомогательной диаграмме состояний [17]. При этом усиливается отличие результирующих ПСН, определяемых разными методами (p, γ).

Другой проблемой метода декомпозиции является учет ПН узлов, инцидентных

ДЭ. Абсолютно надежный ДЭ еще не гарантирует полной связности смежных узлов, поскольку возможен отказ самих узлов. Требуется декомпозиция по трем элементам. Процедура резко усложняется, поскольку число схем при одной декомпозиции в общем случае составляет 2^3 . Однако реально здесь можно ограничиться четырьмя схемами (см. рисунок 4.4): с отключением каждого из узлов (Сх. 1,0; Сх. 0,1) и с декомпозицией связи при абсолютно надежных узлах (Сх. 1,1,0; Сх. 1,1,1). При этом вероятность «нулевого» (все элементы работоспособны) состояния [17]:

$$P_0 = 1 / \left(1 + \gamma_{1,1,1} + \gamma_F (1 + \gamma_{1,0}) + \gamma_G (1 + \gamma_{0,1}) + \gamma_L (1 + \gamma_{1,1,0}) \right),$$

где индексы при γ соответствуют идентификатору схемы.

Вероятность отказа узла назначения:

$$Q = P_0 \left(\gamma_{1,1,1} + \gamma_F \gamma_{1,0} + \gamma_G \gamma_{0,1} + \gamma_L \gamma_{1,1,0} \right).$$

Интенсивность восстановления:

$$\mu = \frac{P_0}{Q} \left(\lambda_{1,1,1} + \lambda_F \gamma_{1,0} + \lambda_{1,0} \gamma_F + \lambda_G \gamma_{0,1} + \lambda_{0,1} \gamma_G + \lambda_L \gamma_{1,1,0} + \lambda_{1,1,0} \gamma_L \right),$$

и интенсивность отказа узла назначения $\lambda = \mu Q / (1 - Q)$.

К числу упомянутых добавляется проблема алгоритмической реализации метода декомпозиции. Реальные СЭС отличаются большой размерностью и многосвязностью. Декомпозиция по одному элементу является скорее исключением, чем правилом. Каждая вызванная декомпозицией новая схема требует новой декомпозиции. Для автоматизированного учета данного фактора используется рекурсия процедуры декомпозиции. Многочисленные эксперименты с использованием рекурсивной процедуры показали ее неприемлемость в практических расчетах из-за переполнения стека при анализе надежности СЭС даже относительно небольшой (несколько десятков узлов) размерности. В результате, метод декомпозиции не может быть рекомендован в качестве основного при расчете надежности сложных схем, однако он может быть полезным на отдельных этапах расчетного процесса.

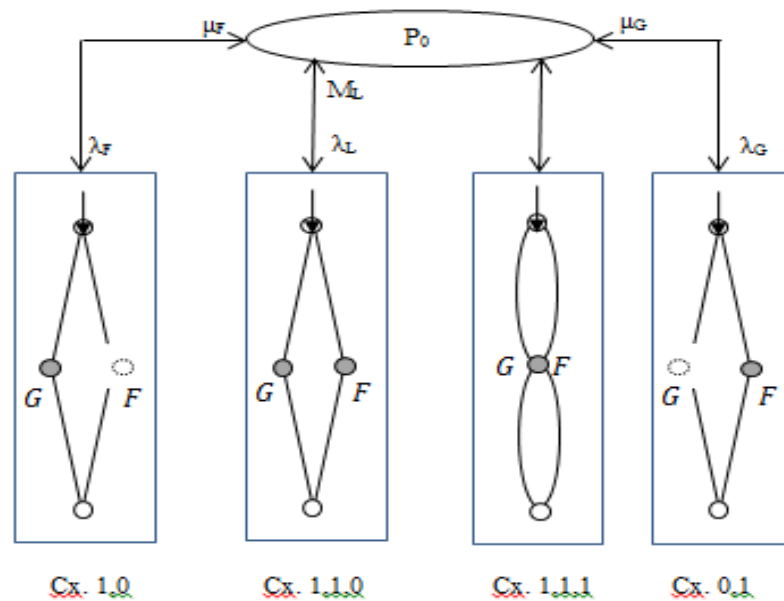


Рисунок 4.4 – Декомпозиция мостика с учетом отказов узлов

Ромб-эквивалентирование. Исключение-восстановление узлов. Существует два алгоритмически отличающихся подхода к определению ПСН узлов нагрузки электрической сети – упомянутый ранее последовательный и параллельный. В первом случае расчетная процедура заключается в циклически последовательном назначении узлов нагрузки в качестве единственного узла (сток), для которого определяются ПСН. В параллельном алгоритме, положенном в основу ПК «Струна», ПСН всех узлов определяются в рамках двухэтапной процедуры — «исключение-восстановление» узлов безотносительно порядка следования узлов нагрузки. Второй подход обладает более высоким быстродействием, однако на этапе восстановления узлов здесь возможно появление систематических погрешностей, вызванных допущением о независимости отказов смежных узлов [17].

Ромб-эквивалентирование. Исключение узлов ранга (число инцидентных связей) 1, 2 и восстановление узлов ранга 1 не представляет каких либо затруднений [16, 19]. Более сложным является восстановление узлов ранга 2, где в методе «ромб-эквивалентировани» используется ВЭ питающей сети двумя эквивалентными связями (x, y). Здесь следует выделить следующие варианты электроснабжения узла i (см. рисунок 4.5):

- электроснабжение рассматриваемого узла осуществляется независимо со стороны обоих смежных узлов j и k (общий случай). Между узлами j , k нет непосредственной связи,

- общий случай, при наличии непосредственной связи между узлами **j**, **k**,
- электроснабжение рассматриваемого и одного из смежных узлов возможно только со стороны другого смежного узла (одностороннее электроснабжение).

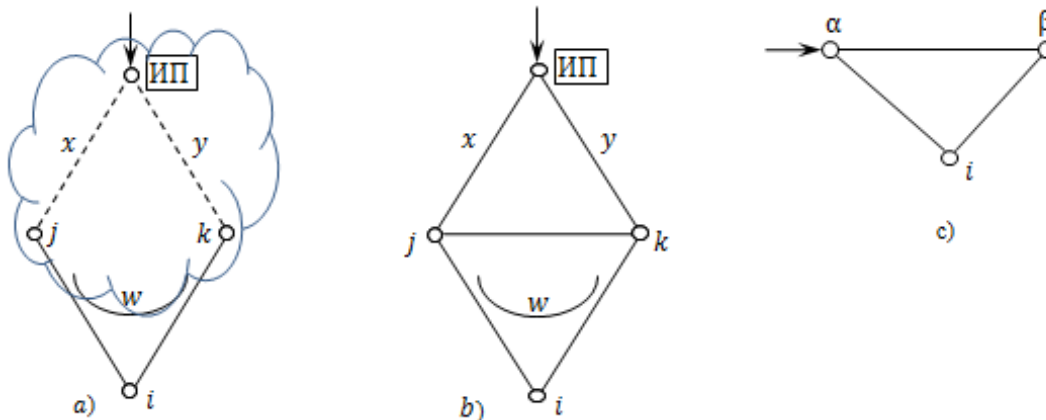


Рисунок 4.5 – Эквивалентирование внешней системы электроснабжения узла *i*:
a – без непосредственной связи между смежными узлами; *b* – схема мостика»; *c* – схема с односторонним питанием

Отсутствие непосредственной связи между смежными узлами. В методе «ромб-эквивалентирование» сеть внешнего электроснабжения (до смежных узлов **j**, **k**) заменяется двумя связями *x*, *y* с ПН, определяемыми по критерию равенства расчетных и результирующих ПН узлов *j*, *k*. Для первого типа электроснабжения расчетная схема представляется в виде последовательно-параллельной схемы (рисунок 4.5, а). Здесь рассматриваемый узел **i** объединен связями *i – j*, *i – k* со смежными узлами **j** и **k** и через эквивалентные ветви **x** и **y** соединяются с источником питания.

Представление части СЭС в виде ветвей **x** и **y** позволяет упростить схему на этапе восстановления узлов второго ранга, т. е. привести ее к удобному для расчета ПН последовательно-параллельному виду. ПН эквивалентных связей определяются на основе критерия равенства полученных ранее результирующих и расчетных ПН смежных узлов **j** и **k**.

Пусть **w** – эквивалентная ветвь, состоящая из последовательно соединенных ветвей *i – j*, *i – k* и узла *i*. Отказ рассматриваемой связи моделируется логическим уравнением

$$A_w = A_{ii} + A_{ij} + A_{ik}, \quad (4.1)$$

где

A_{ii} , – собственный отказ узла i ,

A_{ij} , A_{ik} отказ связей соответственно ij , ik . Plusу соответствует операция дизъюнкции.

Тогда отказы узлов j , k описываются логическими выражениями:

$$\begin{aligned} A_j &= A_{jj} + A_{j*} = A_{jj} + A_x(A_y + A_{kk} + A_w); \\ A_k &= A_{kk} + A_{k*} = A_{kk} + A_y(A_x + A_{jj} + A_w). \end{aligned} \quad (4.2)$$

где

A_{jj} , A_{kk} – собственный отказ узлов j , k ,

A_x , A_y – отказ эквивалентных связей.

Данным логическим формулам соответствуют системы в общем случае нелинейных алгебраических уравнений, из которых определяются ПН ветвей x и y [17].

Полученные ПН эквивалентных связей x , y позволяют получить ПН восстанавливаемого узла i , по отношению к которому схема представляется двумя параллельными связями из последовательно соединенных элементов $\{x, j, i - j\}$ (левая связь) и $\{y, k, i - k\}$ (правая связь). Собственные отказы узла i представляются как последовательно соединенные элементы. Такой структуре соответствует логическая формула

$$A_i = A_{ii} + (A_x + A_{jj} + A_{ij})(A_y + A_{kk} + A_{ik}).$$

Наличие непосредственной связи между инцидентными узлами. Вторым вариантом электроснабжения узла i характеризуется наличием либо непосредственной, либо полученной в результате предварительных ВП электрической сети связи $j - k$ (рисунок 4.5, b). По отношению к узлам j , k связь $j - k$ и последовательная структура $\{i - j$, узел i , $i - k\}$ представляют собой две параллельные ветви, эквивалентные одной связью w с ПН, определяемыми логической формулой

$$A_w = A_{jk}(A_{ji} + A_{ii} + A_{ik}) \quad (4.3)$$

При восстановлении узла i рассматриваемая эквивалентная схема при наличии непосредственной связи $j - k$ является схемой типа «мостик». В этом случае расчет ПН узла i следует выполнять либо методом декомпозиции (удаление и сжатие ветви jk), либо каким-либо иным типом эквивалентирования, например, преобразованием треугольника $i - j - k$ в схему звезды [68], что также достаточно эффективно, но и не менее сложно и, как правило, приводит к появлению погрешностей расчета.

Альтернативой упомянутым процедурам является РСх (рисунок 4.5, а), без непосредственной связи $j - k$ (ромб). При этом на этапе исключения узлов непосредственная связь $j - k$ учитывается в полном объеме, в результате чего результирующие ПН смежных узлов определяются без погрешности, а на этапе восстановления связь $j - k$ не учитывается. Изменение РСх на этапе восстановления меняет ПН эквивалентных элементов x, y без изменения результирующих ПН смежных узлов j, k . ПН исходной связи jk войдут в результирующие ПН узлов j, k , а на этапе восстановления они перейдут в ПН связей x, y . Как показывают многочисленные расчеты, погрешности, вызванные неучетом существующей связи $j - k$ на этапе восстановления узла, несущественны, а описанный подход является достаточно эффективным и может быть рекомендован для практических расчетов.

Одностороннее электроснабжение узла второго ранга. Третий вариант электроснабжения восстанавливаемого узла, где питание осуществляется со стороны лишь одного из смежных узлов, рассматривается особо, поскольку здесь может быть применена более простая РСх (рисунок 4.5, с), не требующая дополнительных ветвей x, y , и, следовательно, исключающая возможность погрешностей, возникающих при ромб-эквивалентировании. Схема одностороннего питания возникает после предварительного восстановления узлов ранга 1. При этом ПН узла питания α могут рассматриваться как ПН одноэлементного сечения для всех восстанавливаемых узлов, в конечном итоге зависящих от узлов α и β .

В заключение необходимо отметить, что основной причиной отличия показателей структурной надежности, определяемых существующими программными комплексами, следует считать неоднозначность положенных в основу расчетного алгоритма систем допущений и ограничений. Наиболее значимым здесь является вероятностное

эквивалентирование электрически последовательных элементов. Допущение о возможности или невозможности кратных отключений последовательно соединенных элементов приводит к существенному отличию результирующих показателей надежности. Предлагается в качестве основного принять метод, основанный на γ -преобразованиях последовательной структуры.

Показано, что метод декомпозиции расчетной схемы, которая может быть использована для расчетов ПСН сложных структур, в том числе структуры «мостик», не учитывает интенсивность отказа элемента, по которому выполняется декомпозиция, что приводит к методической погрешности результирующих ПСН. Для устранения данной погрешности предлагается использовать метод гамма-декомпозиции.

Для расчета систем электроснабжения большой размерности наиболее эффективным является параллельный принцип расчетов, когда ПН узлов нагрузки определяются в рамках единой процедуры «исключение-восстановление узлов расчетной схемы». Для этого предлагается использовать локальное «ромб-эквивалентирование» в качестве базовой процедуры на этапе восстановления очередного узла.

4.4 Оценка вероятностных параметров дефицита мощности локальной арктической объединенной ЭЭС

При развитии какого-либо перспективного региона АЗРФ может возникнуть необходимость объединения нескольких локальных арктических ЭЭС с ВИЭ в одну объединенную (концентрированную) ОЭС. При этом может возникнуть задача оценки вероятностных показателей дефицита мощности и балансовой надежности такой системы.

В данном параграфе описан вероятностно-аналитический метод расчета балансовых показателей таких объединенных электроэнергетических систем. В связи с ограниченностью объема отчета, этот параграф изложен в аннотированном виде, поскольку основные результаты данного исследования опубликованы в статьях [26–29]. Несмотря на то, что первоначально данное исследование было выполнено с прицелом на обыкновенные ЭЭС, все аналитические результаты исследования оказались применимы к арктическим ЭЭС.

При разработке метода в качестве основной принята стратегия распределения генерирующей мощности пропорционально нагрузкам узлов. Распределение перетоков мощности по межсистемным связям осуществляется пропорционально разности углов векторов напряжений в узлах электрической сети. При этом наилучшим методом для оценки искомых показателей оказался *раздельный учет* генерации и нагрузки, с учетом особенностей накопления электроэнергии ВИЭ, входящих в структуру ОЭС.

Анализ учета потерь мощности в межсистемных связях ОЭС показал, что эти потери значимо влияют на результирующие показатели балансовой надежности (БН) реальных ОЭС. Поэтому их учет должен стать неотъемлемой процедурой при оценке БН ОЭС.

При объединении разнотипных генераторных групп с отличающимися вероятностными распределениями располагаемой мощности (что особенно важно при учете особенностей функционирования ОЭС) наиболее эффективным оказался метод фон Мизеса.

Рассмотрена допустимость и возможность практического применения нормального распределения для описания системы генерации при определении вероятностных параметров дефицита мощности в концентрированной, ЭЭС с нормально распределенной мощностью нагрузки. Предложена математическая процедура коррекции функции распределения небаланса мощности рядом Грама-Шарлье, что позволяет существенно улучшить качество решения по сравнению с применением для системы генерации нормального распределения без коррекции.

Дано сопоставление данного метода с *методом эквивалентирования* (см. предыдущий параграф) по двум параметрам: математическому ожиданию и дисперсии.

Рассмотренные математические модели и алгоритмы апробированы на тестовой схеме. В качестве эталонного при оценке результатов принят метод статистического моделирования (Монте-Карло). Для сравнения и обоснования аналитических моделей определено допустимое для обеспечения приемлемой точности решения число испытаний в методе статистического моделирования. Показано место полной свертки вероятностных рядов генерирующей мощности при оценке погрешности вероятностного *моделирования состояний* генерирующих групп.

Сравнение результирующих показателей показало высокую эффективность и приемлемую точность предлагаемого вероятностно-аналитического метода оценки БН ОЛЭС.

4.5 Заключение к разделу 4

Разработаны существенные компоненты расчета и моделирования взаимозависимых энергетических критичных инфраструктур АЗРФ. Основной научной проблемой моделирования взаимозависимых энергетических критичных инфраструктур является синхронное описание их поведения в реальных условиях эксплуатации, когда генерация энергии является прямой функцией погоды (солнце, ветер) в данном районе. Наличие такого описания позволит создать соответствующие расчетные модели анализа их режимной и балансовой надежности с учетом специфики функционирования основных устройств автоматики и релейной защиты, профилактического и ремонтного обслуживания (мейнтенанса).

При решении сформулированной выше задачи рекомендуется использовать разработанные процедуры *вероятностного эквивалентирования*, которые описывают исключения и восстановления узлов в расчетной схеме с отказами типа «обрыв» и «короткое замыкание» в расчетных схемах произвольной сложности. Также целесообразно использовать трехэтапную процедуру анализа статической режимной надежности ЭЭС.

По ходу исследования выявлены существующие пробелы в фундаментальных и прикладных знаниях, которые не позволяют решить многие актуальные задачи надежности и живучести локальных ЭЭС и требуют своего скорейшего разрешения, что явится предметом исследования в 2020 г.

5 Исследование реологических свойств смазочных, в том числе биоразлагаемых, материалов, работающих, в том числе, при сверхнизких отрицательных температурах (до –150 град. Цельсия)

5.1 Создание смазочных композиций, обеспечивающих надежную работу узлов трения машин и механизмов в условиях Крайнего Севера и Арктики

Исследование реологических свойств смазочных, в том числе биоразлагаемых, материалов, работающих в условиях тяжелого нагружения выполнено с использованием методов ротационной вискозиметрии в широком диапазоне изменения температур и скоростей сдвига. На первом этапе исследований температурный диапазон составил от -10 до +150 °С. Скорость сдвига варьировали от 102 до 106 с⁻¹.

Расчет гидромеханических характеристик трибосопряжений осуществлялся с использованием гидродинамической теории смазки. Оценка ресурса шатунных подшипников выполнена методом имитационного моделирования. Для оценки параметров изнашивания конструкционных материалов шатунных подшипников использовались трибометрия и дополнительные методы анализа структуры, микрогеометрии поверхностей и др.

Для измерений вязкости масел в широком диапазоне скоростей сдвига были использованы два сертифицированных вискозиметра. Первый – комплекс Rheotest 4.1N, представляющий из себя ротационный вискозиметр с компьютерным управлением. Rheotest 4.1N позволяет реализовывать скорости сдвига до 6,58·10³ с⁻¹. Для измерения вязкости масел при скоростях сдвига от 6,58·10³ с⁻¹ до 1·10⁶ с⁻¹ был использован имитатор конического подшипника TANNAS TBS 2100E, представляющий собой высокоскоростной вискозиметр, который применяется для определения вязкости СМ при высокой скорости сдвига 106 с⁻¹ и температуре 150 °С в соответствии с методикой ASTM D 4683 для международной вязкостной классификации SAE J300. Имитатор конического подшипника является первым в мире промышленным вискозиметром, способным определять и обеспечивать очень высокий градиент скорости сдвига в процессе своей работы. Эта возможность прибора TBS является уникальной.

Особое внимание было уделено исследованию биоразлагаемых смазочных материалов, обеспечивающих надежную работу узлов трения машин и механизмов в условиях пониженных температур.

Исследована возможность использования сложных эфиров лимонной и аконитовой кислот в качестве противоизносных (AW) и противозадирных (EP) присадок к

растительным маслам. Целью исследования является разработка полностью нетоксичных добавок AW / EP для ряда смазочных материалов. Такие материалы включают как биоразлагаемые смазочные материалы на основе растительных масел, так и смазочные материалы на основе синтетических углеводородов для оборудования для пищевой промышленности. Было установлено, что сложные эфиры многоосновных кислот и алифатических спиртов могут проявлять противоизносные свойства на уровне, сопоставимом с диалкилдитиофосфатами цинка. Возможность повышения растворимости таких добавок в растительных маслах при низких температурах при использовании смеси различных спиртов для этерификации также была выяснена.

Результаты экспериментов показали, что введение тригексадецилового эфира аконитовой кислоты (AAE-добавки) в состав растительного масла значительно улучшает противоизносные свойства. Отсутствие влияния этой присадки на антифрикционные свойства масла в указанных условиях можно объяснить следующим образом. Для углеводородных масел введение добавок AW / EP обычно приводит к увеличению антифрикционных свойств в переходном и граничном режимах трения. Это связано с влиянием адсорбированного аддитивного слоя на реологические параметры соседних слоев жидкости. Растительные масла (рапсовое или подсолнечное) состоят из триглицеридов, содержащих кислород. Благодаря наличию дипольных моментов связи между триглицеридами прочнее связей между углеводородами. Таким образом, растительные масла изначально являются более структурированными жидкостями, чем углеводородные масла. Эффект адсорбированного слоя полярного компонента распространяется на чрезвычайно тонкий слой жидкости.

В условиях моделирования радиального подшипника гидродинамические давления обеспечивают разделительный слой смазки даже при высоких контактных давлениях. В этом случае сила трения обусловлена реологическими параметрами масла². В случае трения плоских поверхностей сила трения определяется параметрами чрезвычайно тонкого слоя смазки. В этих условиях эффект присутствия полярного компонента проявляется. Таким образом, определение влияния потенциальных добавок AW / EP на растительное масло требует моделирования параметров технических узлов трения, для которых предназначен этот смазочный материал.

² Levanov I., Doykin A., Zadorozhnaya E., Novikov R. Investigation Antiwear Properties of Lubricants with the Geo-Modifiers of Friction // Tribology in Industry, 2017. Vol. 39. No. 3. P. 302–306.

Дополнительно была сделана оценка возможности использования биоразлагаемых смазочных материалов в узлах трения машин, работающих в условиях низких температур, на примере расчета гидромеханических характеристик шатунного подшипника ДВС.

В качестве критерия оценки надежности трибосопряжения использован ряд параметров, в том числе: интенсивность изнашивания, ресурс, несущая способность и набор гидромеханических характеристик.

6 Анализ возможных механизмов достижения предельных состояний (накопление перемещений, малоцикловая усталость) при взаимодействии конструкции реактора с жидкометаллическим теплоносителем

6.1 Введение

Реакторы с жидкометаллическим теплоносителем, с точки зрения расчетов на прочность и безопасность, отличаются от водо-водяных и газоохлаждаемых реакторов прежде всего высокими градиентами температур, что связано с высокими (до десятков кДж/м²К) значениями коэффициентов теплоотдачи от теплоносителя к элементам конструкции. Высокие градиенты температур приводят к появлению высоких тепловых напряжений и, зачастую, к пластическому деформированию, которое не может быть предотвращено, например, увеличением сечений конструктивных элементов (как в случае механического нагружения). Повторное пластическое деформирование на переменных режимах для этих конструкций является одним из ключевых факторов, определяющих прочность и долговечность.

Безопасность конструкции часто характеризуется набором коэффициентов запаса; наиболее типичными являются запас по нагрузке и запас по долговечности. В общем случае при малоцикловом термомеханическом нагружении эти запасы не могут быть вычислены один через другой, поэтому нормативные документы (см., например, [1, 2]) требуют отдельного определения этих значений.

Определение запаса по долговечности опирается на вычисление повреждения, которое конструкция получает за один цикл нагружения при действии рабочих нагрузок. Допустимая долговечность затем вычисляется как число циклов, за которое накапливается допустимое повреждение. Несмотря на известные трудности (нелинейный характер суммирования повреждений, разброс нагрузок от цикла к циклу, блочное нагружение, разброс свойств материала и т.д.), эта задача имеет важную упрощающую особенность – нагрузка полагается известной.

Второй задачей является определение запаса по нагрузке. Существует два очевидных частных случая, в которых эта задача может быть решена относительно просто: линейные задачи и задачи об однократном нагружении. В случае линейного поведения материала (хрупкие линейно-упругие материалы или пластичные материалы в области многоцикловой усталости) коэффициент запаса по нагрузке равен коэффициенту запаса по напряжениям. В случае однократного нагружения коэффициент запаса определяется путем выполнения расчета кинетики поведения конструкции при

возрастающей нагрузке – до тех пор, пока вычисленные перемещения не достигнут опасной величины (нередко используется другое условие: пока производная от перемещений по нагрузке не станет велика, т.е. так называемый «предельный анализ»). Этот подход рекомендуют, например, подразделы 5.2.1–5.2.3 норм [1].

При циклическом неупругом нагружении такой подход, строго говоря, требует выполнения серии расчетов кинетики деформирования при разных нагрузках, при этом каждый расчет включает расчет достаточного (для стабилизации) числа циклов, каждый цикл – ряд моментов времени, каждый момент времени – несколько итераций для определения пластических деформаций. Получаемая процедура является очень трудоемкой [3].

Дело осложняется еще и тем, что при увеличении нагрузок может меняться тип деформирования конструкции – знакопеременное течение, накопление деформаций, их сочетание [4]. Разным типам отвечают разные свойства материала – разные проявления циклического упрочнения, ползучести, взаимодействия циклики и ползучести [5-8].

Если даже оставить пока в стороне зависимость свойств материала от типа деформирования, все равно задача выполнения серии расчетов кинетики остается очень трудоемкой.

Чтобы ускорить расчет, часто предполагают, что механизм деформирования (т.е. распределение скоростей пластических деформаций по объему конструкции в течение цикла) при изменении нагрузки качественно не меняется. Особенно оправданным такое предположение выглядит, если нагрузка характеризуется всего одним параметром (в отличие от традиционных многопараметрических задач теории приспособляемости – см., например, [9]). Это предположение не всегда является обоснованным и может приводить к существенным ошибкам не в запас прочности. В работе демонстрируются, в том числе, связанные с этим особенности расчетов.

6.2 Возможность ускорения расчетов стабильных циклов

6.2.1 Оценка предельной нагрузки

В настоящий момент самым распространенным способом оценки предельной для конструкции нагрузки («предельной» в смысле, используемом в теории приспособляемости – нагрузки P^* , при которой в конструкции из пластичного материала перемещения u начинают быстро возрастать: $du/dP \rightarrow \infty$) является применение МКЭ с последовательным увеличением нагрузки. ASME Boiler and Pressure Vessel Code [1] рекомендуют такой метод, полагая предельной нагрузкой P^* такую, при которой сходимость конечно-элементного решения по напряжениям и перемещениям не достигается даже при малом шаге по нагрузке.

Существуют и другие варианты – так называемые прямые подходы (см., например, [20]) и попытки их численной реализации, однако они в силу сложности пока не получили широкого распространения.

В качестве относительно простой альтернативы предлагается комбинация традиционного МКЭ с идеей статической теоремы теории предельного анализа и методами условной минимизации. Как известно, если существует поле остаточных напряжений, которое в сумме с действующими при данной нагрузке дает напряжения внутри поверхности текучести, то данная нагрузка не превосходит предельную. В качестве такого поля остаточных – т.е. самоуравновешенных – напряжений можно рассмотреть поле напряжений от некоторого (фиктивного) распределения температуры. Варьирование параметров этого температурного поля обеспечит поиск максимального значения нижней оценки предельной нагрузки – в рассматриваемом классе полей остаточных напряжений, естественно. Рассматриваемый класс полей ограничен (хотя бы предположением об изотропии теплового расширения), но этот подход позволяет без каких-либо дополнений использовать существующие пакеты МКЭ для прямого поиска оценки предельной нагрузки – если только эти пакеты обладают средствами оптимизации, позволяющими подбирать «температурное» поле («температуры» в узлах КЭ-сетки) по критерию максимизации нижней оценки предельной нагрузки.

В качестве методического примера на рисунке 6.1 показаны результаты оценки предельной нагрузки для модельной конструкции – консольной балки прямоугольного сечения (эта задача имеет хорошо известное аналитическое решение). Подходу, предлагаемому Boiler and Pressure Vessel Code [1], соответствует верхняя кривая с пометкой «МКЭ». Видно, что решение МКЭ дает верхнюю оценку предельной нагрузки –

т.е. ошибку не в запас прочности. Оценка этой ошибки – в отсутствие известного точного решения – является нетривиальной: с одной стороны, расчет делается путем постепенного увеличения нагрузки, т.е. должен подходить к предельной нагрузке снизу (и многие именно так воспринимают результаты расчетов МКЭ – как нижнюю оценку предельной нагрузки); с другой – энергетические формулировки, на которых построен МКЭ, и задание поля перемещений (базисных функций) соответствуют кинематическому подходу теории предельного анализа, дающему верхнюю оценку. Получающаяся комбинация («подход снизу к верхней оценке») не может быть однозначно интерпретирована, но, например, в рассматриваемой задаче (рисунок 6.1) результирующая ошибка оказалась ошибкой не в запас прочности. По мере измельчения элементов (т.е. справа налево на рисунке 6.1) ошибка, как следовало ожидать, уменьшается, но хорошая точность достигается лишь при достаточно мелких сетках.

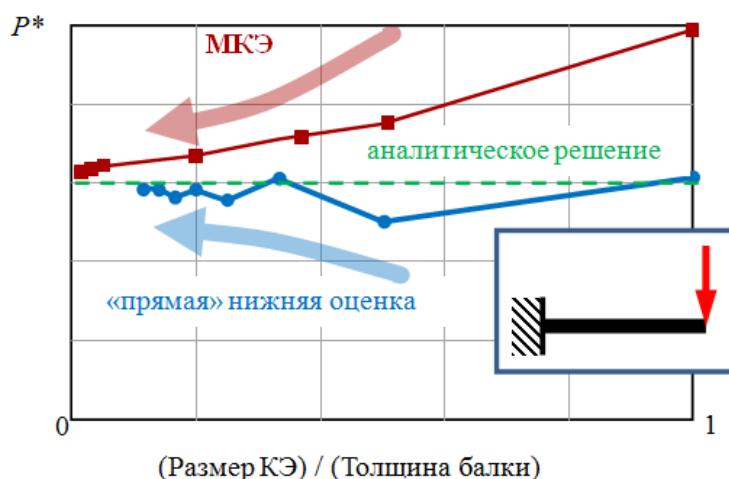


Рисунок 6.1 – Результаты оценки предельной нагрузки для модельной задачи

Подход с использованием «температурных» полей для определения условий, задаваемых статической теоремой теории предельного анализа, иллюстрирует на рисунке 6.1 ломаная, помеченная «прямая нижняя оценка». Качество оценок отличается для четного и нечетного количества КЭ по толщине балки, но оно достаточно хорошо уже на крупных сетках, и оценка, как видно из рисунка 6.1, является нижней, т.е. ошибка идет в запас прочности.

Нужно отметить, что с технологической точки зрения получение одной точки на кривой «МКЭ» требует выполнения ряда шагов по нагрузке, на каждом из которых выполняется нелинейный расчет, т.е. требуется значительное число итераций. «Прямая» оценка заключается (для каждого размера КЭ) в решении задачи минимизации с

достаточно большим числом варьируемых параметров («температурами» в узлах КЭ-сетки), но решаемые задачи, к счастью, линейны и не требуют итераций. Даже при использовании методов, не учитывающих линейность задачи (например, метода метамоделей – «subspace optimization» в пакете ANSYS), достигается очень существенная (разы) экономия времени счета.

6.2.2 Оценка параметров стабильного цикла. Накопление повреждений

При анализе циклического нагружения проблема, рассмотренная в предыдущем разделе, становится еще острее. Во-первых, вместо одной предельной нагрузки, отвечающей условию «начало быстрого роста перемещений», появляется несколько: отвечающая смене упругого деформирования (в стабильном цикле после приработки) неупругим – знакопеременным течением или накоплением, отвечающая смене чистого знакопеременного течения комбинированным нагружением, комбинированного – прогрессирующим накоплением, и прогрессирующего накопления – предельным равновесием. Во-вторых, расчет каждой из этих нагрузок при использовании традиционного МКЭ представляет собой серию расчетов – но в отличие от рисунка 6.1, каждый расчет (точка на кривой рисунка 6.1) является расчетом какого числа циклов (до стабилизации), причем поведение конструкции в каждом цикле является неупругим, т.е. требуется рассмотрение большого числа моментов времени в цикле и какого-то числа итераций для каждого момента. Результирующая трудоемкость оказывается чрезвычайно высока.

Попытки снизить трудоемкость предпринимаются. Например, в последних версиях пакета ABAQUS остаточные напряжения, обеспечивающие стабильный (замкнутый) цикл подбираются с использованием разложения изменения напряжений во времени в ряд Фурье – что требует включения в пакет (разработки, верификации) соответствующего модуля. Ниже показано распространение идеи, разобранный в предыдущем разделе, на случай циклического нагружения.

В качестве методического примера рассмотрим известную задачу Бри [18] – рисунок 6.2.

При наличии пластического деформирования, в полном соответствии с теорией приспособляемости, решение задачи не является единственным: накопленные деформации могут зависеть от начального состояния, т.е. от остаточных напряжений (тогда как размахи деформаций, определяемые размахом температур, определены однозначно). Влияние начального состояния может приводить к эффектам, которые при

недостаточно глубоком анализе производят впечатление ошибки – типа «исчезновения» размаха интенсивности деформаций после некоторого числа циклов (рисунок 6.3б).

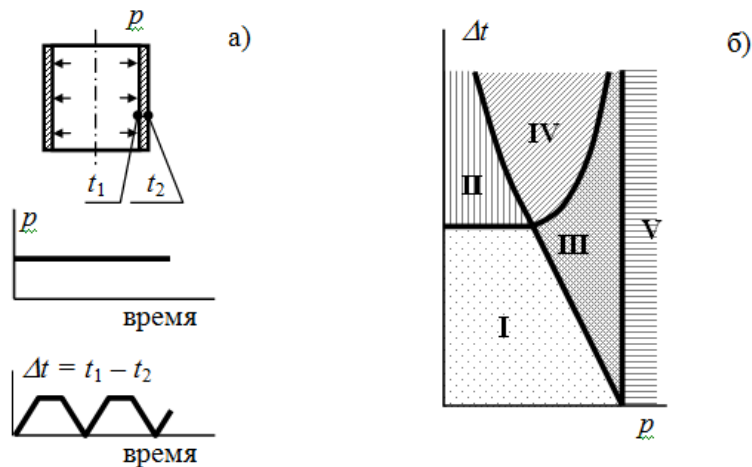


Рисунок 6.2 – Деформирование цилиндрической оболочки при циклическом нагружении
 а) схема конструкции и программа нагружения; б) типы деформирования в стабильном цикле в зависимости от нагрузок без учета неустойчивости процессов и изменения свойств материалов

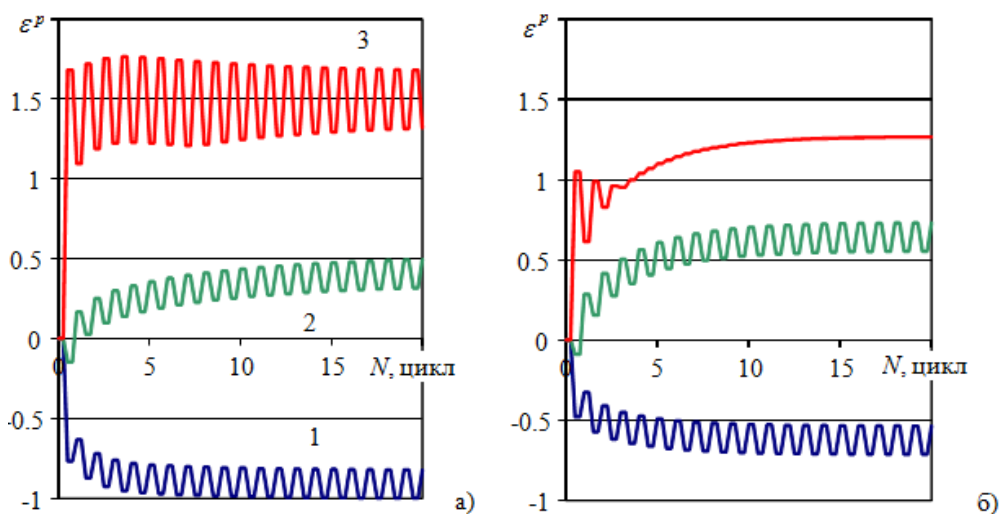


Рисунок 6.3 – Зависимость пластической деформации от числа циклов.
 Кривая 1 – осевая деформация, 2 – окружная, 3 – интенсивность. а) начальное состояние – нулевое, б) начальное состояние – с остаточными напряжениями

На самом деле показанный на рисунке 6.3б эффект вызван лишь одним – при определенных начальных напряжениях траектория точки, изображающей поведение конструкции в пространстве деформаций (рисунок 6.4), оказывается касательной к поверхности текучести, размахи компонентов при этом не меняются (что видно и из

рисунка 6.3б). Но соотношение между приращением деформации за цикл и размахом деформации (в стабильном цикле) может меняться, соответственно, может меняться соотношение между накапливаемыми за цикл приращениями циклического и статического повреждения. (На этапе приработки, т.е в первых циклах, это соотношение меняется еще и от цикла к циклу – рисунок 6.5.)

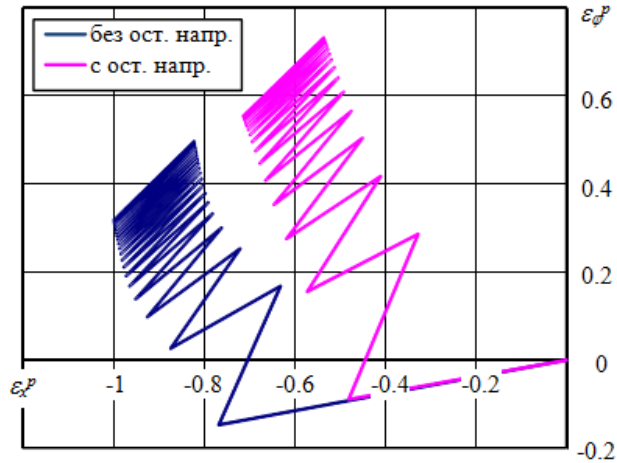


Рисунок 6.4 – Изменение компонент тензора пластической деформации с числом циклов

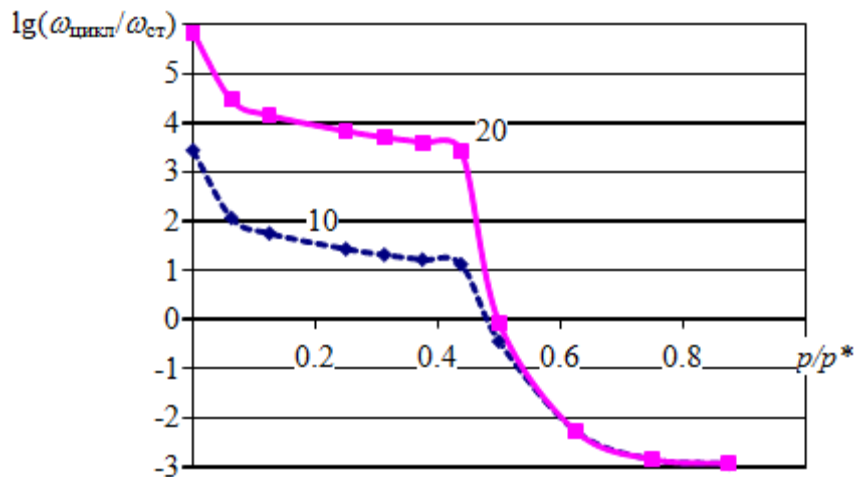


Рисунок 6.5 – Соотношение между расчетными значениями циклического $\omega_{цикл}$ и статического $\omega_{ст}$ повреждений в 10 и 20 цикле при размахе температур $\Delta t = 2.5[2(1-\mu)\sigma_s/\alpha E]$

Приработка конструкции, т.е. выработка поля остаточных напряжений, стабилизирующих процесс, происходит (при отсутствии ползучести) за несколько десятков циклов – рисунок 6.6, кривая 1. Оценка повреждений для конструкций,

испытывающих за срок службы достаточно большое количество циклов, заметно превышающее число циклов на этапе приработки, опирается на стабильный цикл – т.е. требует МКЭ-расчета достаточного количества циклов (до стабилизации).

Для поиска поля остаточных напряжений, ускоряющего расчет стабилизации, предлагается использование рассмотренного ранее приема: в качестве источника самоуравновешенных остаточных напряжений рассматривается «тепловое» поле. Для упрощения задачи минимизации подбираются не температуры в каждом узле КЭ-сетки, а лишь некоторое число параметров, описывающих температурное поле. Ниже приведен пример, когда в задаче Бри распределение «температуры» T_r (связанной с остаточными напряжениями, а не с заданными нагрузками) по толщине стенки описывалось многочленом 2-й степени:

$$T_r(z) = Az^2 + Bz$$

(постоянная составляющая «температуры», естественно, не оказывает влияния на решение). Подбор параметров A и B проводился 2 разными способами: путем минимизации пластической диссипации за цикл:

$$D = \int_t \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^p dV dt \rightarrow \min$$

и путем минимизации различия между напряжениями в начале и конце цикла:

$$\delta = \int_V \left(\int_t \dot{\sigma}_{ij} dt \right)^2 dV \rightarrow \min.$$

Параметры, обеспечивающие минимум величин D и δ , различны – рисунок 6.7. Более того, ни одна из найденных комбинаций не приводит сразу к стабильному циклу – в силу того, что варьируемое «температурное» поле и создаваемое им поле остаточных напряжений имеет малое число степеней свободы. Однако получаемые «остаточные» напряжения все же ближе к стабильным, и количество циклов, которое нужно рассчитать до стабилизации, существенно уменьшается – кривые 2 и 3 на рисунке 6.6. Это уменьшение становится особенно заметным для задач со сложной геометрией и высокими требованиями к точности (сетке КЭ), где расчет одного цикла может занимать часы.

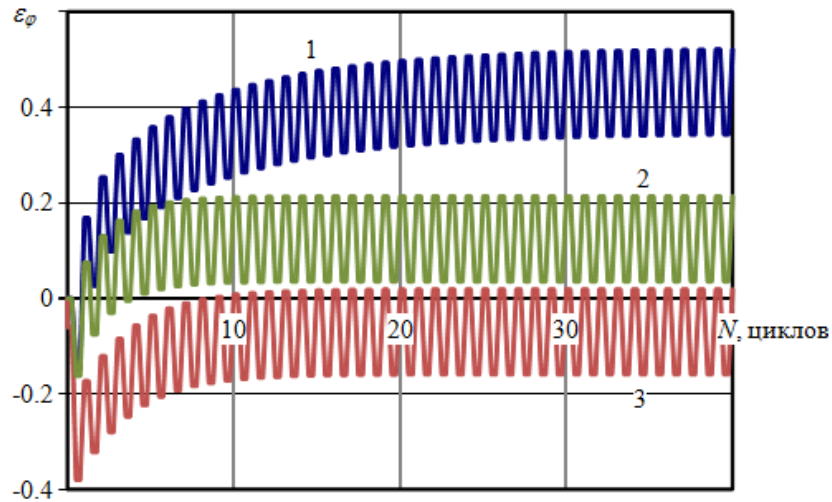


Рисунок 6.6 – Зависимость окружных пластических деформаций в задаче Бри от числа циклов:
 1 – без остаточных напряжений на начало 1-го цикла, 2 – с начальными напряжениями, подобранными по критерию $\min(D)$, 3 – с начальными напряжениями, подобранными по критерию $\min(\delta)$

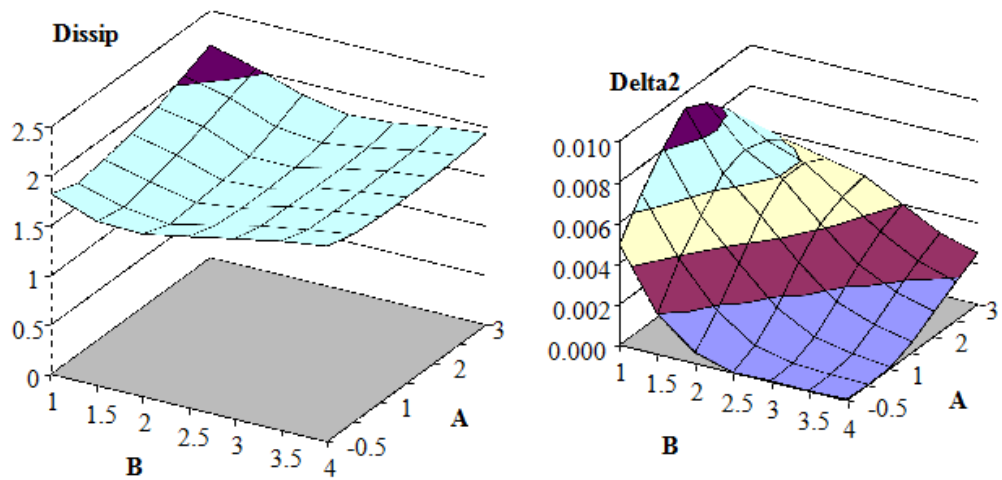


Рисунок 6.7 – Зависимость величин D и δ от параметров A и B (пояснения в тексте)

6.3 Возможность смены механизма деформирования при монотонном изменении параметра нагрузки

6.3.1 Цилиндрическая оболочка при циклических изменениях уровня теплоносителя

Рассмотрим цилиндрическую оболочку, частично омываемую горячей жидкостью – рисунок 6.8а. Пусть уровень жидкости циклически меняется. Такая ситуация типична для ряда конструкций химического машиностроения, а также для атомных реакторов с жидкометаллическим теплоносителем [10, 11], поэтому анализируется в целом ряде работ – см., например, [12–14 и др.]. В качестве методического примера для численных расчетов рассмотрена оболочка из стали 12Х18Н10Т с наружным диаметром 84 мм, толщиной стенки 2 мм; нижний конец оболочки закрыт, теплоноситель (жидкий натрий) с температурой 500°С (773К) омывает только наружную поверхность оболочки. Материал полагается циклически стабильным (стабилизированным): подобно работе [15], проводится строгое различие между накоплением деформаций в материале и в конструкции, и рассматривается только последнее.

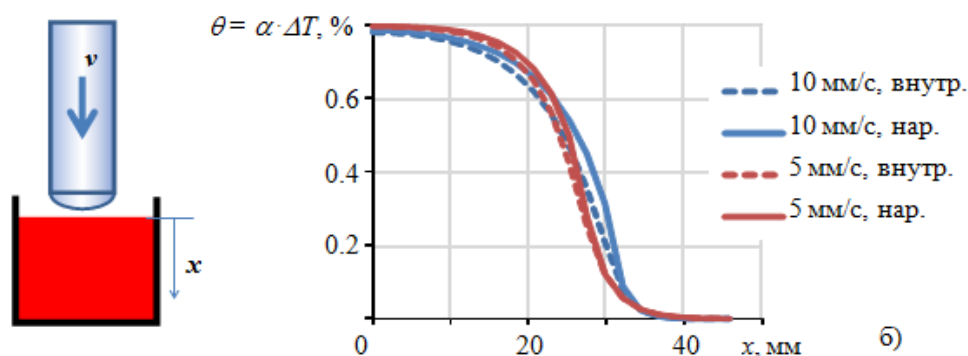


Рисунок 6.8 – Погружение оболочки в горячий теплоноситель: а) схема задачи, б) расчетные распределения температур вдоль оси оболочки при разных скоростях опускания (на наружной и внутренней поверхности)

При опускании возникает движущееся вдоль оси оболочки квазистационарное температурное поле; расчетные распределения температур на внутренней и наружной поверхностях оболочки для двух разных скоростей опускания (5 и 10 мм/с) показаны на рисунке 6.8б.

Последовательные проходы тепловой волны в определенных условиях могут вызывать непрекращающееся с числом циклов накопление перемещений в конструкции –

[16]. Различие в величинах температур (рисунок 6.8б) при рассмотренных значениях скорости опускания невелико, однако расчет кинетики неупругого деформирования показывает, что вызываемое им накопление перемещений (изменение диаметра оболочки) при разных скоростях имеет разные знаки – рисунок 6.9.

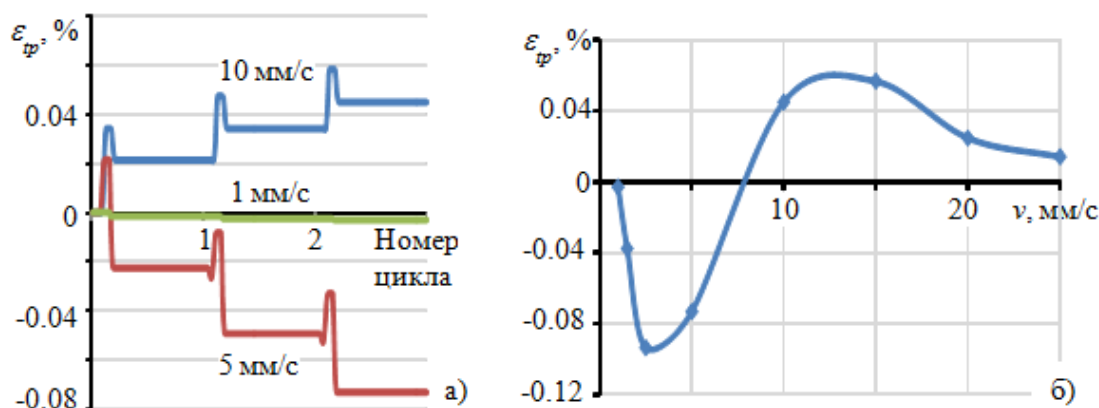


Рисунок 6.9 – Накопление окружной пластической деформации с числом циклов: а) поцикловая кинетика деформаций при разных скоростях опускания; б) накопленная за 3 цикла деформация

Причиной такого поведения конструкции является то, что напряжения в цилиндрических оболочках зависят даже не от градиента температуры (как обсуждается, например, в [13]), а от второй производной от температуры по длине [17], и небольшим видимым отличиям в температурах (рисунок 6.8б) соответствуют существенно разные вторые производные – рисунок 6.10. При этом расчеты – или испытания [12] – на ограниченном количестве режимов не дают ответа о поведении конструкции при вариации режимов. Строго говоря, изменение одного параметра – скорости опускания оболочки – приводит к непропорциональному изменению напряжений, т.е. с точки зрения формы поля напряжений это нагружение не является однопараметрическим. Однако оно является однопараметрическим с точки зрения человека, эксплуатирующего конструкцию (строго однопараметрический случай обсуждается в следующем разделе).

Эксперименты, проведенные О.Ф. Чернявским и А.В. Ильиным, подтверждают возможность получения разных знаков изменения диаметра при изменении только одного параметра – скорости опускания оболочки (рисунок 6.11). Расчетное предсказание скорости погружения, при которой наблюдается изменение знака накопления деформаций, совпадает с соответствующей скоростью, найденной в этих экспериментах.

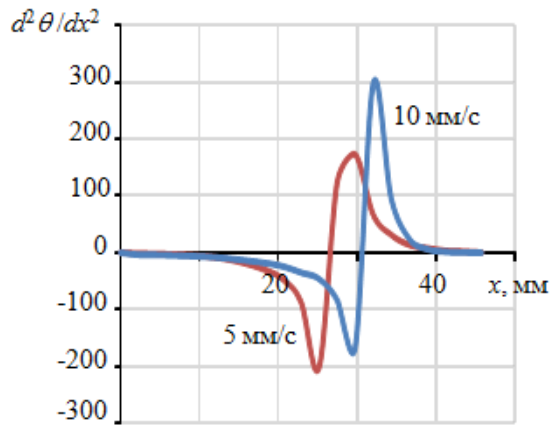


Рисунок 6.10 – Вторая производная от температуры по длине (на наружной поверхности оболочки)



Рисунок 6.11 – Экспериментальные результаты

6.3.2 Круглая пластина, нагруженная движущимся по радиусу тепловым полем

Следующий пример иллюстрирует изменение поведения конструкции при пропорциональном изменении температурного поля. Тонкий диск нагревается от центра, затем плавно охлаждается. Предполагается, что во время нагрева температурное поле имеет вид движущейся по радиусу диска тепловой волны (рисунок 6.12а); при охлаждении градиенты температур по радиусу отсутствуют. Расчеты кинетики

деформирования, как и в предыдущем случае, обнаруживают поцикловое накопление деформаций разных знаков при разных величинах воздействий – рисунок 6.12б.

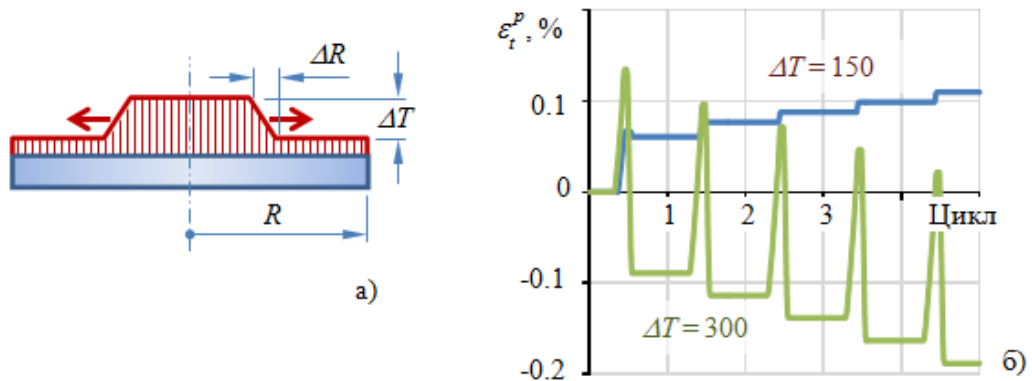


Рисунок 6.12 – Диск при циклических нагревах от центра:
 а) схема задачи, б) кинетика окружных пластических деформаций в точке $r = R/2$ при разных перепадах температур

Отметим, что при изменении нагрузки меняется тип деформирования (в соответствии с классификацией [4]) накопление деформаций ($\Delta T=150$) сменяется комбинированным деформированием ($\Delta T=300$), при котором отличны от нуля не только приращения деформаций за цикл, но и размахи деформаций. Появление дополнительной циклической составляющей повреждения должно быть учтено при оценке долговечности.

В рассмотренной простейшей конструкции с изменением воздействий меняется не только тип деформирования (возможность такого поведения описана достаточно давно – см., например, [18]), но и механизм деформирования. Причем изменение механизма выражается не только в изменении знака накопления деформации за цикл с изменением воздействия (рисунок 6.13а), но и в изменении вида распределения деформаций по объему конструкции – рисунок 6.13б.

Анализ показывает, что такое поведение конструкции связано с несколькими факторами: разным характером напряженного состояния в разных точках конструкции; различием нагрузок, вызывающих пластическое деформирование в этих точках; неодновременным (в течение цикла) изменением пластических деформаций в разных точках; возможностью пластического течения не в 2, а в большее количество моментов времени цикла. Все эти факторы иллюстрируют годографы напряжений в координатах «радиальные напряжения – окружные напряжения» и скорости пластических деформаций, показанные на рисунке 6.14.

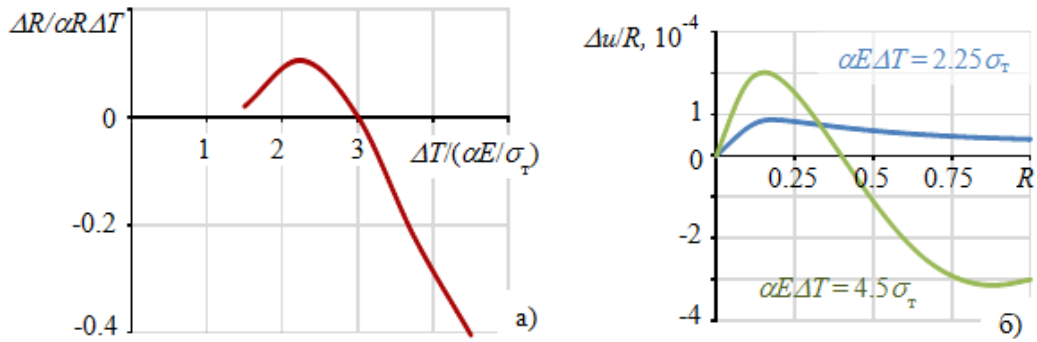


Рисунок 6.13 – Изменение механизма деформирования при изменении нагрузки: а) накопленные перемещения в конце 5-го цикла на наружном радиусе; б) приращения перемещений в стабильном цикле

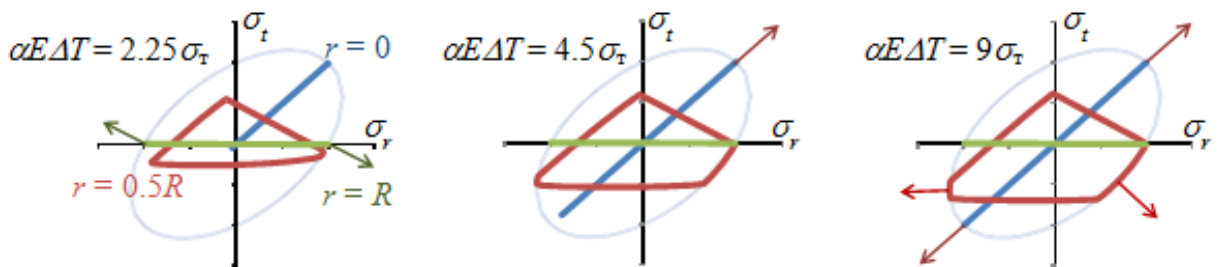


Рисунок 6.14 – Годографы напряжений в стабильном цикле в разных точках конструкции при разных значениях перепада температуры

6.3.3 Образец Коффина для испытаний на термоусталость

При испытаниях на термоусталость используется так называемый образец Коффина: закрепленный двумя концами стержень, подвергаемый циклическим нагревам и охлаждениям – рисунок 6.15а. Ожидается, что при такой схеме испытаний будет реализовываться чистое знакопеременное течение, однако эксперименты показывают, что это не так: даже при закрепленных концах может возникать накопление деформаций за счет «перетекания» материала по длине образца, в некоторых случаях такое накопление является значительным – рисунок 6.15б [19].

Автор работы [19] объясняет появление накопления неоднородностью температурного поля по длине образца (из-за теплоотвода в головки). Легко видеть, что это может приводить к накоплению только в комбинации с зависимостью свойств материала от температуры: если свойства полагаются постоянными, то при любом распределении температур по длине напряжения (из условий равновесия) и деформации должны быть одинаковы во всех точках образца.

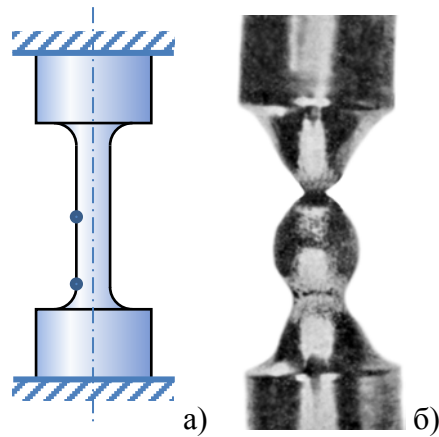


Рисунок 6.15 – Образец Коффина:
а) схема, б) вид образца после испытаний [7]

Расчеты кинетики неупругого деформирования в этой задаче обнаруживают «накопление деформаций» в ситуации, когда его быть не должно – в случае использования модели идеально упруго-пластического материала со свойствами, не зависящими от температуры. При этом результаты расчетов «устойчиво» реагируют на изменение условий: при разных знаках различия температуры в центре и на краю образца знаки приращения деформаций за цикл в точках A и B также меняются – рисунок 6.16. Получающаяся «зависимость» однако не соответствует эксперименту: при $T_A - T_B > 0$ в эксперименте накапливается сжимающая деформация в точке A и растягивающая в точке B – рисунок 6.15б.

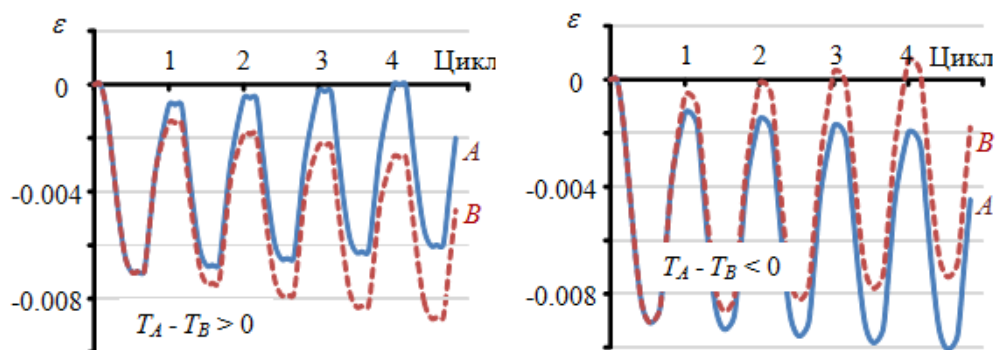


Рисунок 6.16 – Накопление деформаций в точках образца Коффина при неравномерном распределении температуры по длине

Причиной такого несоответствия конечно-элементного расчета эксперименту является неустойчивость физического процесса и особенности расчетных алгоритмов. При отсутствии деформационного упрочнения материала (идеально упруго-пластический материал) процесс знакопеременного течения является неустойчивым: различные варианты процесса (без накопления или с накоплением разных знаков) с энергетической точки зрения равноценны. При этом кажущаяся «устойчивость» результата (рисунок 6.16) может вводить расчетчика в заблуждение и влиять на результаты расчетной оценки долговечности конструкций.

6.4 Заключение к разделу 6

Разработанные методы ускорения счета обеспечивают заметный выигрыш при расчете процесса приработки конструкции и упрощают, таким образом, оценку накопления повреждений в стабильном цикле для конструкций с достаточно большой долговечностью (естественно, в малоцикловой области).

Доказательство сохранения типа и механизма деформирования при увеличении нагрузки – или демонстрация их изменения – являются критически важными для оценки прочности и долговечности, а также для планирования (при необходимости) ускоренных испытаний. Предположение о сохранении типа и механизма деформирования при монотонном изменении единственного параметра нагружения, несмотря на внешнее правдоподобие, является верным не всегда и требует тщательного анализа.

7 Моделирование эколого-экономических сценариев пространственного развития арктических регионов России

Работа была выполнена в рамках научного проекта № 18-9-17-37, реализуемого совместно с Федеральным исследовательским центром комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова Российской академии наук (г. Архангельск).

7.1 Введение

В Арктическом регионе пересекаются геополитические, оборонные, макроэкономические, экологические и научные интересы нашего государства. Особенности эксплуатации потенциально опасных объектов в арктических условиях, производящих 11% национального дохода России и 22% российского экспорта при доле населения всего в 1%, позволяют практически все их отнести к взаимозависимым критичным инфраструктурам.

АЗРФ характеризуется экстремальными климатическими условиями, низкой устойчивостью экосистем, слабой заселенностью (менее 5 чел/кв.км), недостаточно развитой инфраструктурой и транспортно-логистической сетью. Все это предопределяет необходимость поиска новых инновационных решений по развитию арктических и северных территорий на основе интеграции результатов научной исследований, направленных на эффективное использование имеющихся конкурентных преимуществ АЗРФ, с существующей практикой эксплуатации потенциала АЗРФ и современными технологиями. Необходимо научиться оценивать конкурентный потенциал арктических регионов через системы уже существующих и перспективных КИ.

Любая деятельность человека в АЗРФ должна учитывать следующие аспекты освоения ее природных ресурсов и развития прибрежных территорий Арктики: технологию изучения Арктики и Севера, энергетическую и транспортно-логистическую инфраструктуру макрорегиона, обеспечение жизнедеятельности и защита природной среды; сохранение традиционного образа жизни коренного населения, в том числе малочисленных народов Севера.

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности функционирования децентрализованных энергетических систем (ЭС) и комплексов и обеспечения устойчивого энергоснабжения населенных пунктов Крайнего Севера с минимизацией их опасного воздействия на окружающую среду при возникновении

аварийных ситуаций (АС) природного и техногенного характера с учетом возможных ущербов.

Специфика природно-климатических условий Крайнего Севера выдвигает особые требования для комплексного решения проблемы безопасности жизнедеятельности при возникновении аварий в системе энергоснабжения (СЭ), которые сопровождаются значительным экономическим ущербом. Решение этой проблемы напрямую зависит от применяемой методологии оценки надежности объектов энергетики и является основой устойчивого функционирования производственного потенциала арктических территорий страны.

В данном исследовании основное внимание уделено проблеме создания научных инструментов обеспечения стабильного развития арктических и северных территорий и высокого качества жизни населения за счет создания оптимальной системы критичных инфраструктур АЗ РФ и эффективной ее эксплуатации.

Для количественного управления объектами ВКИ необходимо иметь соответствующие модели их описания и функционирования. Наиболее приспособленные для решения этой задачи являются сетевые модели. Среди этой категории моделей выделяются логико-структурные модели, впервые предложенные И.А. Рябининым, различные транспортные сетевые модели, модели сетей Петри и Байесовские сети [1, 2].

Объявленные цели проекта.

Этап 2 (2019 г.):

- а) разработка математических моделей функционирования гибридных энергетических объектов (ГЭО),
- б) построение математических моделей прогнозирования возможных последствий пожаров и взрывов и развития каскадных аварий на топливно-энергетических потенциально опасных объектах.

Полученные за отчетный период важнейшие результаты, их актуальность, сопоставление полученных результатов с мировым уровнем. Проведен сбор и классификация исходных данных о функционировании энергетических объектов Арктики. Выполнен аналитический обзор отечественных и зарубежных источников по эксплуатации потенциально опасных объектов в условиях низких температур, сопровождающихся каскадным развитием аварий.[A1]

Показано, что гибридная ЭЭС в арктическом исполнении с позиций структурной надежности представляет собой автономную сложно-скомпонованную систему отдельных

подсистем. В совокупности они представляют собой систему взаимозависимых критичных инфраструктур (ВКИ). Основной научной проблемой *пространственного моделирования развития взаимозависимых энергетических критичных инфраструктур является синхронное описание их поведения в реальных условиях эксплуатации.*

Разработана *расширенная модель транспортной сетевой КИ*, которая позволяет моделировать взаимозависимые инфраструктуры в виде единой сети, а также их производительность. Модель включает в себя инструменты для проведения временного анализа ВКИ с несбалансированным спросом и предложением в результате поврежденной из-за аварии инфраструктуры.

Методы и подходы, используемые в ходе выполнения проекта. В ходе выполнения проекта были использованы методы системного анализа, математического моделирования, теории вероятности и математической статистики, теории структурной надежности и нелинейного программирования в контексте конвергентной науки инфранетики; метод пороговых значений, построение деревьев событий, пробит-функций, геоинформационных технологий.

Процесс теоретических и (или) экспериментальных исследований, включая определение характера и содержания теоретических исследований, обоснование необходимости проведения экспериментальных работ, принципы действия разработанных объектов, их характеристики

7.2 Этап 2, а) разработка математических моделей функционирования гибридных энергетических объектов (ГЭО)

Гибридная ЭЭС в арктическом исполнении с позиций структурной надежности представляет собой автономную сложно-скомпонованную систему отдельных подсистем, каждая из которых обеспечивает выработку электричества от какого-то одного источника возобновляемой/невозобновляемой энергии. *В совокупности они представляют собой систему взаимозависимых критичных инфраструктур.*

Применительно к объектам энергетики их основной заданной функцией является снабжение потребителей соответствующей энергетической продукцией (энергоресурсом) требуемого качества. Ниже за основу принята усовершенствованная транспортная модель, предложенная в [16]. Узлы в данной статье *синтетической* рабочей модели функционирования *взаимозависимых систем критичных инфраструктур* (ВКИ) обычно представляют физические компоненты (так называемые *активы*) инфраструктуры (например ТЭЦ, ГРЭС, трансформаторные подстанции в ЭЭС, нефтеперекачивающие, газокompрессорные станции в нефтегазопроводах, водонасосные станции в водоводах и водопроводах, а также железно- и автодорожные узлы; госпитали; производственные, офисные и жилые здания и т.п.), которые непосредственно участвуют в *снабжении* населения и различных производств различными *продуктами* или предметами потребления, в том числе *услугами*). Ниже при описании *процесса снабжения* будем использовать обобщенное понятие «*продукт*» для всех типов и видов потребления. Представленная в статье модель позволяет моделировать функционирование ВКИ на локальном уровне. В связи с этим она имеет большую разрешающую способность, чем обычные модели, построенные для ВКИ национального масштаба, поскольку может учитывать местные особенности ВКИ, таких как наличие хранилищ продуктов и аварийных генераторов.

Модель рассматривает условия и особенности снабжения, поставки, *перегрузки* и спроса на ресурсы (например, электроэнергию, горячую и холодную воду, уборку отходов жизнедеятельности человека или производств) [1].

7.2.1 Обобщенная вероятностная модель ВКИ в виде сетевого потока

Описываемая ниже модель инфраструктуры является обобщением существующих моделей транспортных сетей (сетевых потоков). Инфраструктура представлена диграфом

$G(V, E)$, т.е. множеством узлов (вершин) V , соединенных направляющими ребрами E . В *стандартной* модели узлы представляют собой физические компоненты инфраструктуры, ответственные за снабжение, перегрузку (перевалку) продукта, а ребра – за поток (транспорт, продвижение) продукта между узлами [3].

Модель разработана для моделирования поведения ВСКИ на *локальном* уровне при обычных и чрезвычайных условиях их функционирования (например, при техногенной аварии, природной катастрофе или террористической атаке). Для этого в существующую модель [3] введены следующие модификации:

- при повреждении инфраструктуры моделирующая ее сеть может оказаться *несбалансированной*, т.е. общий спрос на конкретный продукт k может превысить его фактическое наличие. Для возможности моделирования вводятся переменные λ_k , которые описывают возникший неудовлетворенный спрос/дефицит (т.е. разность между объемом фактического спроса на продукт и его реально доступным объемом), а также соответствующие возникшему дефициту стоимости или штрафы c_k^λ ;
- живучесть систем взаимозависимых инфраструктур может быть повышена за счет использования *локальных* складов хранения и/или производства продукта (например, запасных насосов или генераторов).

Параметры, описывающие качество функционирования физических компонентов (*активов*) *инфраструктурной* сети (таких как мощность производства и транспортировки продукта, спрос), можно рассматривать в первом приближении как случайные величины (СВ). Можно также дать научно обоснованные значения вероятностей отказов каждому узлу сети (активу). Эти вероятности находятся либо по статистическим данным об отказах активов, либо по данным соответствующих вероятностных расчетов.

Для учета *неудовлетворенного спроса* в модель добавлены переменные s_k и π_k , представляющие соответственно объекты хранения и производства, каждая со своими расходами c_k^s и c_k^π . Таким образом, модель различает продукт, получаемый *извне* (т.е. из источников, находящихся за пределами рассматриваемой местной инфраструктуры), от продукта *местного* производства и хранения. Однако, чтобы произвести продукт k , как правило, потребляется другой продукт(ы) n . Чтобы различать *традиционные* поставки (извне) от внутреннего производства, переменная π_k рассматривается как сумма двух переменных:

- $\pi_{k,k}$, представляющих традиционные поставки (из источника, находящегося за пределами рассматриваемой местной инфраструктуры),

- $\pi_{n,k}$, представляющих *внутреннее* производство (т.е. учитывается потребление продукта n для производства продукта k),
- аналогично, переменная K_k , представляющая потребление продукта k , тоже является суммой двух переменных:
 - $K_{k,k}$, которые обозначают *традиционный* спрос на продукт k ,
 - $K_{n,k}$, обозначающие (*внутреннее*) потребление продукта k для производства продукта n .

Ребра рассматриваемой модели аналогичны тем, что используются в традиционной транспортной сети: каждое ребро модели является потоком/поставкой одного продукта.

Узлы (вершины графов) представляют собой такие объекты инфраструктуры (активы), как генерирующие электричество и тепло ГРЭС и ТЭЦ, электрические подстанции, газокomppressorные и нефтеперекачивающие станции, водные и очистные сооружения, водонапорные башни и насосные станции, которые в основном связаны с производством и транспортировкой продуктов. Узлами являются также больницы, магазины, офисные и жилые здания, которые являются потребителями продуктов/ресурсов. Ребра сети моделируют поток (транспорт продукта) между узлами и могут представлять собой линии электропередач, линейные части магистральных и распределительных нефтегазопроводов, водоводов, систем канализации, а также железные и автодороги и др.

Количество хранимых продуктов в узле может меняться со временем. В частности, когда инфраструктура из-за аварии или катастрофы повреждена и имеющиеся в наличии продукты используются для компенсации возникших недопоставок. Для учета этого важнейшего обстоятельства в модель в явном виде введен фактор времени.

Процесс решения задачи начинается с момента возникновения *иницирующего отказа* (аварии или катастрофы инфраструктуры) события, времени t_0 . Решения отыскиваются в дискретные моменты времени с шагом Δt (который может быть переменным) до момента полного восстановления поврежденной инфраструктуры. На каждом временном шаге все переменные и константы остаются неизменными [4]. При прогнозе возможного повреждения инфраструктуры (т.е. оценки вероятности ее частичного или полного отказа), вне зависимости от характера воздействия, необходимо количественно оценить значительную неопределенность параметров, входящих в уравнения. Эта оценка осуществляется либо путем установления вероятностей отказа для активов инфраструктуры, представленных узлами, либо представления емкости производства и/или объема поставок как случайной величины. Поскольку спрос на

продукты может быть неопределенным, он в данной модели также рассматривается как случайная величина (СВ).

Если узел способен *одновременно* быть производителем и потребителем продукта(ов) и при этом осуществлять перевалку и быть местным хранилищем продуктов, иметь в своем составе аварийные генераторы и принадлежать одновременно нескольким разным КИ, то он называется *многофункциональным* узлом.

7.2.2 Формулировка оптимизационной задачи

В общем случае задачи, связанные с оптимизацией функционирования КИ и их систем, можно решить простым перебором (при небольшой размерности задачи), а также с помощью различных аналитических методов (линейного и динамического программирования, метода жадных алгоритмов и др.). Выбор метода решения не формализован и зависит от конкретной задачи.

Отличие разработанной в данной работе модели от существующих состоит в том, что она позволяет оптимизировать функционирование инфраструктуры по какому-либо критерию риска, в частности, за счет минимизации суммарной стоимости ее функционирования с учетом полного возможного ущерба в каждой конкретной ситуации, в том числе, с возможными человеческими потерями и жертвами. При этом вводятся новые члены, которые количественно описывают нематериальный ущерб (увечья, смерти).

Рассматриваемая задача оптимизации (минимизации) затрат на поддержание сети инфраструктуры в рабочем (проектном) состоянии формулируется как задача линейного программирования.

Минимизация общей стоимости отдельно на каждом временном шаге еще не дает оптимального решения для функционирования инфраструктуры в течение всего рассматриваемого периода времени. Когда сетевая инфраструктура находится в полностью рабочем состоянии, очевидно, что оптимальное количество хранимых продуктов равно нулю, поскольку, если все работает нормально, нет необходимости хранить продукты и нести дополнительные расходы. Однако, когда сетевая инфраструктура повреждена, наличие продуктов на хранении может привести к снижению общей стоимости (поскольку зачастую существуют дополнительные высокие штрафные затраты из-за неудовлетворенных потребностей). Численно эта проблема решается либо путем искусственного задания отрицательных расходов на хранение (что предотвращает использование хранимых продуктов в нормальных условиях), либо путем

минимизации общей стоимости по всем рассматриваемым моментам времени. Иными словами, целевая функция описывается как сумма расходов по всей траектории (всем шагам) изменения состояния критичной инфраструктуры. Второй подход представляется более предпочтительным, однако для его использования необходимо знать время, необходимое для восстановления инфраструктуры из аварийного состояния в исходное неповрежденное (как новое). Это время может служить хорошим *критерием живучести и стратегической готовности инфраструктуры*, но может быть трудно предсказуемым в силу значительной неопределенности многих параметров. Здесь для получения практических результатов может оказаться необходимым применение специальных вероятностных моделей – нечеткой логики, интервальных вероятностных оценок и др.

7.2.3 Пример вероятностного анализа локальной инфраструктуры транспортного типа

Проанализируем, на основе описанной выше модели, функционирование системы, состоящей из *двух взаимозависимых критичных инфраструктур* (электро- и водоснабжение) расположенных в одном из городов на крайнем севере России (см. рис. 1) во время *экстремальной зимней метели*, характеризующейся ветром с ураганными скоростями, которые бывают 1 раз в 100 лет (запроектное событие), с одновременным повышением температуры атмосферного воздуха до уровня, вызывающего образование наледи на проводах линий электропередач.

Моделирование экстремальной зимней метели в данном отчете не рассматривается, поскольку это является отдельной задачей из класса анализа последствий воздействия стихии на конструкции системы взаимозависимых КИ. Она решается путем рассмотрения совместного воздействия ветра и обледенения на прочность, устойчивость и колебания конструкций опор и проводов как механических систем. В результате решения этих задач *статистической механики* получают так называемые *кривые повреждаемости* (fragility curves), которые *связывают физические параметры ветра* (его среднюю скорость и дисперсию, температуру воздуха, интенсивность и продолжительность снегопада и др.) с *вероятностью того или иного повреждения опор* (перекос, опрокидывание, потеря устойчивости отдельных стержневых элементов и т.п.) и *проводов* (провисание, контакт двух соседних проводов линии, обрыв).

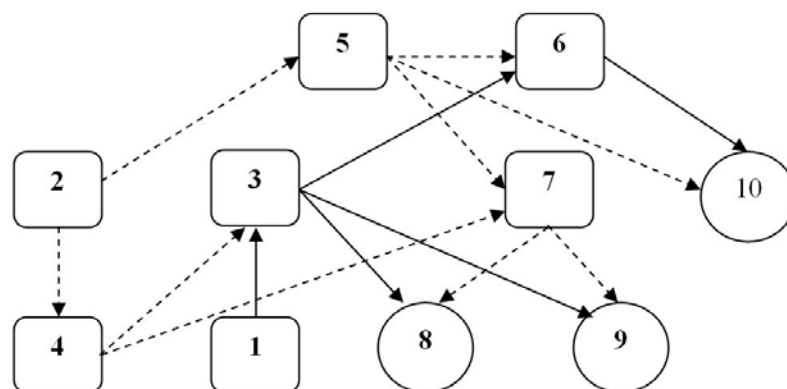


Рисунок 7.1 – Локальная сеть инфраструктуры. Ребра: сплошные линии – водопроводы, пунктирные – ЛЭП

В состав *местной* энергосистемы (первая КИ) входят четыре электрических подстанции – подстанция государственной сети (узел 2), с максимальной мощностью 20 МВтч/день) и три распределительных подстанции: узлы 4 и 7 с максимальной распределительной мощностью 5 МВтч/день и узел 5 с максимальной распределительной мощностью 10 МВтч/день. Вторая КИ включает в себя: водоочистную станцию (узел 1) с максимальной производительностью 1000 м³ питьевой воды в сутки; водонапорную башню (узел 3), с максимальной емкостью 550 м³; и насосную станцию (узел 6) с максимальной мощностью насоса 200 м³/сут, которые потребляют электроэнергию для перекачки воды. Принято, что для перекачки 7,5 м³ воды требуется 1 кВтч. Водопотребителями являются больница (узел 8), дом престарелых и окружающие его жилые кварталы (узел 9), и жилой район (узел 10), чьи ежедневные потребности в электричестве и воде приведены в таблице 7.1. Узлы и связи между ними схематично изображены на рисунке 7.1.

Таблица 7.1 – Ежедневные потребности в электричестве и воде рассматриваемых элементов КИ

Потребитель	Суточные потребности	
	Электричество, МВтч/сут	Вода, м ³ /сут
Больница (узел 8)	1,3	35
Дом престарелых и окружающие его жилые кварталы (узел 9)	3,1	75
Жилой район (узел 10)	6,0	165

Было проанализировано два варианта: 1) без аварийных генераторов; 2) с аварийными генераторами в узлах 3, 6 и 8. Каждый генератор, мощностью 12 кВт, потребляет один литр дизтоплива на производство 3 кВт и снабжен топливным баком емкостью 100 л.

В рассматриваемом примере затраты на передачу, хранение, производство и дефицит продуктов не являются фактическими расходами и назначаются для того, чтобы продукты распределялись между потребителями по назначению. Для того, чтобы предотвратить использование хранимых продуктов (воды и топлива) до момента, пока не будет никакого другого пути для удовлетворения спроса, затраты на их хранение устанавливаются отрицательные. В примере задана, в порядке убывания, следующая иерархия приоритетов в получении необходимых ресурсов: больница, дом престарелых, жилой район. Финансовые, материальные и социальные ущербы, связанные с нехваткой воды и электроэнергии для этих потребителей устанавливаются в соответствии с этими приоритетами.

Для трех подстанций в случае обрыва высоковольтных проводов из-за совместного действия ветра и обледенения были получены следующие вероятности отказа: узел 4 – 0,4, узел 5 – 0,6, и узел 7 – 0,2. Поскольку подстанции могут быть только в двух состояниях (работа или отказ/отключение), то вся сеть имеет 23 состояния и вероятности легко вычисляются аналитически. Инфраструктура будет работать и в частично поврежденном состоянии до момента восстановления ЛЭП, которое может занять несколько дней.

В качестве иллюстративного примера выполнен анализ объема поставок электричества и воды потребителям в зависимости от времени восстановления ЛЭП (в течение 1–6 дней, с шагом в один день).

Есть несколько параметров, характеризующих эффективность сетевой КИ, которую можно оценить. На рисунках 7.2 и 7.3, показаны вероятности поставки потребителям необходимого количества (т.е. спроса) электричества и воды без использования аварийных генераторов. Видно, что перебои в электроснабжении могут начаться в первый же день и далее результаты (т.е. процент поставок и соответствующие вероятности) не меняются в течение рассматриваемых 6 дней. Перебои в подаче воды могут произойти в первый день только в жилом районе (узел 10) из-за отказа поставок электроэнергии для насосной станции (узел 6). Хранение воды в водонапорной башне гарантирует, что вода будет поставляться в полном объеме в больницу (узел 8) и в дом престарелых, в том числе и в окружающие жилые кварталы (узел 9). Перебои в подаче воды у этих потребителей могут начаться на третий день и ситуация ухудшится на шестой день.

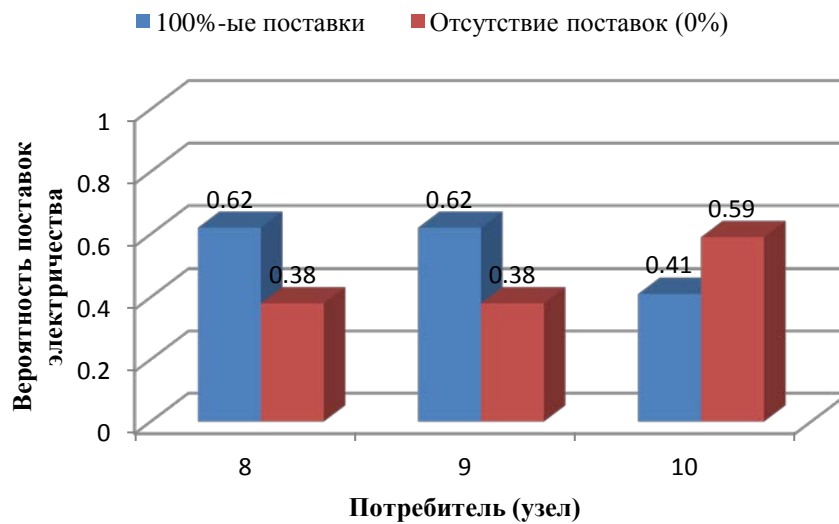
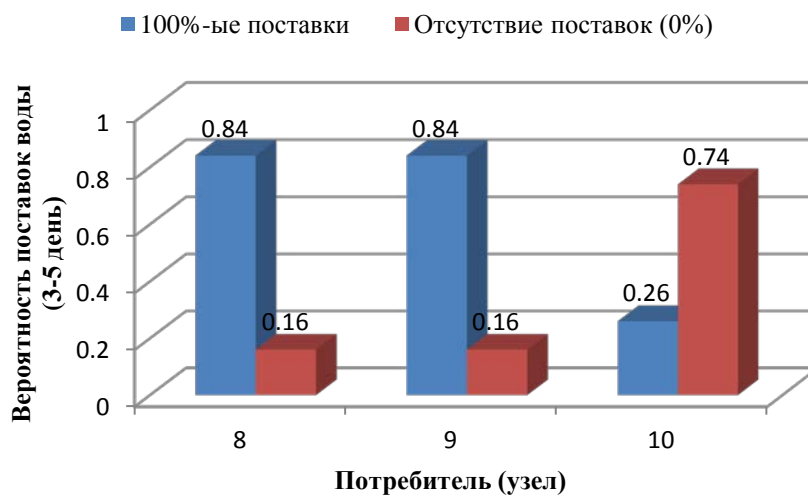
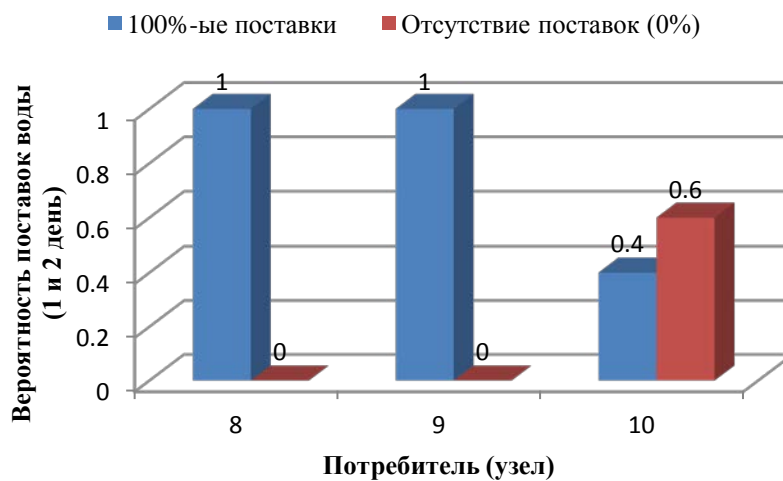


Рисунок 7.2 – Вероятность снабжения электричеством потребителей (без учета генераторов)



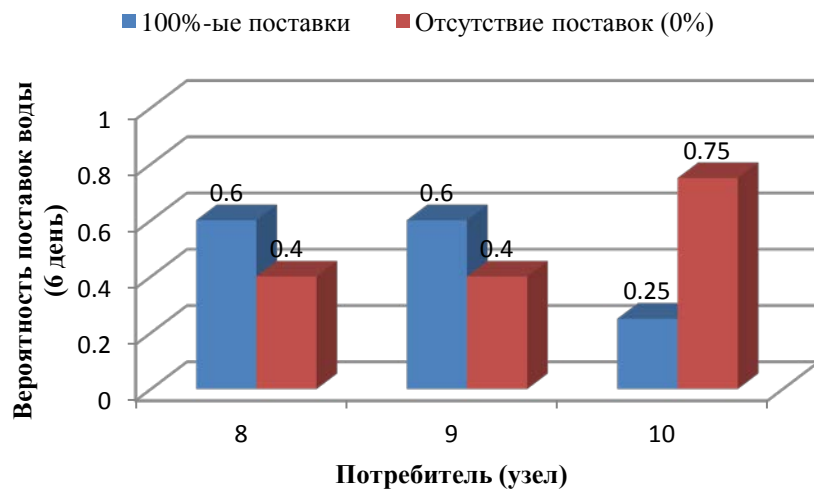


Рисунок 7.3 – Вероятность снабжения водой потребителей в течение шести дней после аварии (без учета генераторов)

7.3 Этап 2, б) построение математических моделей прогнозирования возможных последствий пожаров и взрывов и развития каскадных аварий на топливно-энергетических потенциально опасных объектах

Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации [5, 6] подтверждается активными исследованиями российских ученых [5, 6] в направлении обеспечения безопасности потенциально опасных объектов (ПОО) Северного региона. Одной из важнейших составляющих этих исследований является изучение анализа риска для объектов, которые используют, хранят и транспортируют сжиженный природный газ (СПГ) в больших объемах. Отметим, что этому вопросу посвящено значительное число зарубежных публикаций [7–18]. В отечественных исследованиях [19–32] наиболее интересны работы рамках исследования по теме проекта Сафонова В.С. и его соавторов [19–22], Болодьяна И.А. [23], Кочетова Н.М. [24], Старовойтовой Е.В., Галеева А.Д., Поникарова С.И. [25–28].

ПОО, использующие сжиженный природный газ, несут особую опасность, так как при аварийном разливе СПГ имеет место интенсивное парообразование с формированием протяженных пожаровзрывоопасных облаков. Парообразование при аварийном выбросе сжиженного газа обусловлено мгновенным вскипанием перегретой жидкости, если газ хранится при повышенном давлении кипением (испарением) пролива сжиженного газа, возникновением аэрозолей при взрывном вскипании и их последующим испарением. Процессы парообразования и рассеяния образующихся примесей в атмосфере отличаются сложным взаимным влиянием, которое учесть в рамках упрощенных аналитических и эмпирических соотношений крайне проблематично [23].

В существующих моделях описание источника поступления газообразного вещества вследствие парообразования крайне сложно и это является главным препятствием для адекватной оценки зон распространения паровоздушных облаков. Недостаточное знание процессов, связанных с поступлением опасных веществ в атмосферу и их последующим рассеянием, не только не позволяет предсказать масштабы и течение возможных аварий, но и обосновать необходимый уровень безопасности (риска) технологических систем, содержащих сжиженные газы, выбрать экономически эффективные проектные и конструкторские решения.

7.3.1 Краткая характеристика сжиженного природного газа

СПГ – это криогенная жидкость, являющаяся смесью углеводородов ряда C₁-C₄ с содержанием метана более 90%. Количество углеводородов ряда C₅-C₈ в составе сжиженного природного газа допустимо, но ограничено долями процента и должно контролироваться, так как их повышенное содержание будет приводить к запарафиниванию поверхности криогенных технологических узлов.

Компонентный состав СПГ представлен в таблице 7.2. В таблицах 7.3 и 7.4 отображены основные физические характеристики СПГ и зависимость плотности и температуры кипения СПГ от состава газа и избыточного давления соответственно [33].

Таблица 7.2 – Компонентный состав СПГ

№ п/п	Показатель	Норма, %
1	Объемная доля метана	92±6
2	Объемная доля этана	4±3
3	Объемная доля пропана и более тяжелых углеводородов	2,5±2,5
4	Объемная доля азота	1,5±1,5
5	Массовая доля сероводорода и меркаптановой среды	не более 0,005

Из таблицы 7.2 видно, что основную массовую долю в СПГ имеет метан от 92 до 98 %.

Таблица 7.3 – Основные физические характеристики СПГ

№п/п	Характеристики	Значения
1	Температура кипения при атмосферном давлении, °С	-162
2	Плотность сжиженного газа при атмосферном давлении, кг/м ³	430
3	Низшая теплота сгорания (при 0°С), МДж/м ³	35,2
4	Пределы воспламенения СПГ при процессе газификации, %	5-15
5	Температура самовоспламенения газовой смеси, °С	557
	Удельная теплоемкость СПГ, Дж/(кг °С)	3450
	Удельная теплота испарения, Дж/кг	510789,6

Чистый СПГ не горит, не воспламеняется и не взрывается сам по себе. На открытом пространстве при нормальной температуре СПГ возвращается в газообразное

состояние и быстро смешивается с воздухом. При испарении природный газ может воспламениться, если произойдет контакт с источником пламени. Для воспламенения концентрация природного газа в воздухе должна составлять от 5% до 15% (объемных). Если концентрация менее 5%, то газа будет недостаточно для начала возгорания, а если более 15%, то в смеси будет слишком мало кислорода.

Таблица 7.4 – Зависимость плотности и температуры кипения СПГ от состава газа и избыточного давления

№п/п	Давление, МПа	Состав, % метана	Молекулярная масс, кг/кг*моль	Плотность, кг/м ³	Температура кипения, °С
1	0,5	97	16,7	392	-135
2		80	20,9	459	-132
3	0,1	97	16,7	422	-162
4		80	20,9	495	-160

7.3.2 Моделирование процессов растекания и испарения сжиженного природного газа (СПГ)

При авариях с разлитием СПГ и формировании пожаровзрывоопасного облака в окружающем пространстве, основным определяющим параметром процесса является скорость испарения с поверхности разлитой жидкости. Скорость испарения СПГ зависит от суммарного теплового потока, подводимого к жидкости от поверхности, на которую разлился СПГ, конвекции из окружающей атмосферы, а также радиации (солнечной или пламени пожара) [23].

Вопрос испарения криогенных жидкостей был изучен в классическом фундаментальном труде В. Маршалла «Основные опасности химических производств [7]. Исследования показали, что при разлитии СПГ происходит его разделение на фракции, и первыми испарятся вещества с более низкой точкой кипения. Это означает, что слой вытекшей жидкости становится, со временем, все более богатым тяжелыми углеводородами, его температура будет повышаться. Такой процесс может привести к изменению величин теплового потока, что, как считают, в свою очередь, будет способствовать возникновению быстрого фазового перехода (БФП) или «беспламенного взрыва». Разница между температурой разлитого СПГ и окружающей средой составляет около 180°С. Однако столь большой перепад температур не всегда гарантирует высокую

скорость передачи тепла. Это происходит вследствие существования двух режимов кипения – пузырькового и пленочного, характеризующихся значительно отличающимися коэффициентами теплопередачи [7].

При умеренных перепадах температур (обозначим соответствующую величину ΔT на границе между кипящей жидкостью и твердым телом тепловой поток пропорционален примерно ΔT^3 . Это соотношение нарушается, когда пузырьчатое кипение переходит в пленочное и слой пара отделяет кипящую жидкость от твердой стенки. Первоначально кипение происходит в пленочном режиме и, если количество добавляемой воды достаточно мало, она разливается по поверхности в виде маленьких капель, каждая из которых подобна судну на воздушной подушке. Как только температура поверхности снизится, произойдет режима кипения с пленочного на пузырьковый. Таким образом, тепловой поток стремится к максимуму при увеличении перепада температур, а затем наблюдается быстрый спад до минимума. Дальнейшее повышение ΔT за этой точкой вызывает увеличение теплового потока (однако значительно более медленное, чем при пузырьковом кипении), который при этом режиме пропорционален примерно $(\Delta T)^{0,75}$ [7].

Для получения максимально точных результатов зон поражения и количественной оценки риска необходимо адекватно определить массу испарившегося СПГ, которая, в свою очередь, зависит от интенсивности испарения как переменной во времени. На уровне нормативных документов этот вопрос отсутствует. В большинстве публикаций нет практических рекомендаций по этому вопросу. Наиболее полно освещены процессы испарения при проливе криогенных жидкостей в работах [21, 23, 24].

Процесс пролива и испарения криогенных жидкостей подробно рассмотрен в исследовании И.А. Болодяна [23]. При проливе СПГ на твердую поверхность при нормальных условиях разность температур, в первоначальный момент времени, достигает $\Delta T=181^\circ\text{C}$. При такой разности температур, твердая поверхность по отношению к жидкости будет как «раскаленная сковородка». В этот момент к жидкости направлен значительный поток тепла (до 100 кВт/м^2), и она практически мгновенно закипает. Процессы кипения жидкостей, в том числе криогенных, хорошо изучены экспериментально. На рисунке 7.4 представлена кривая кипения для жидкого метана. В зависимости от характера образования паровой фазы различают пузырьковое кипение, при котором пар образуется во многих местах греющей поверхности и поднимается вверх в виде отдельных пузырьков, и пленочное кипение, при котором между поверхностью и жидкостью образуется сплошная паровая пленка. В статье отмечается, что при разности температур $\Delta T < 40^\circ\text{C}$ обычно наблюдается пузырьковое кипение. При контакте криогенной жидкости с поверхностью по мере ее охлаждения тепловой поток к жидкости

уменьшается и падает скорость испарения (примерно по линейному закону). Однако при $\Delta T=40^\circ\text{C}$ для метана происходит скачкообразное увеличение теплового потока (так называемый второй кризис кипения) за счет резкого увеличения процесса теплообмена между поверхностью и жидкостью. В этот момент достигается наивысшая скорость испарения (первый кризис кипения). По мере дальнейшего падения ΔT она снова уменьшается (по закону ΔT^5).

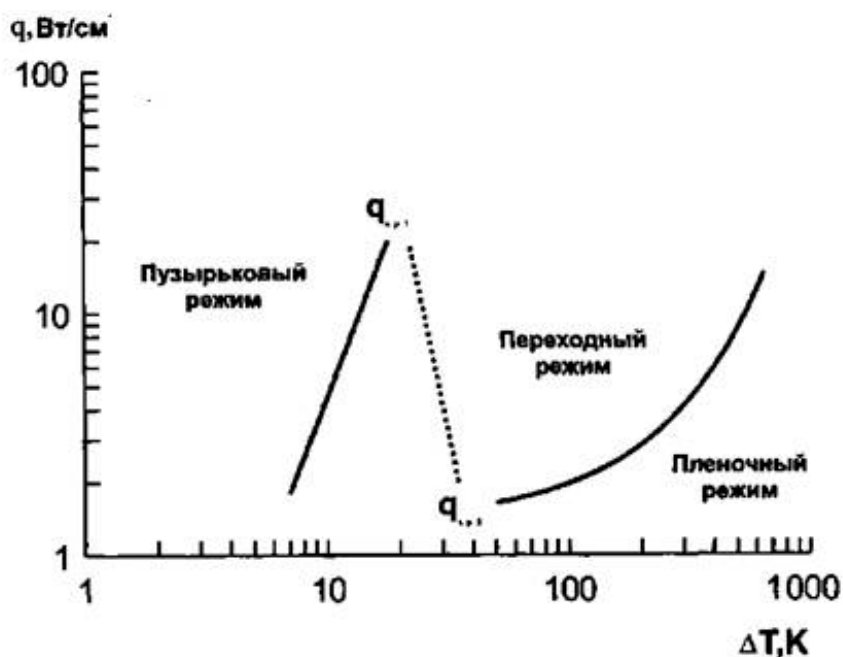


Рисунок 7.4 – Кривая кипения метана

При пленочном кипении между поверхностью разлития и СПГ образуется паровая пленка, благодаря которой процесс растекания происходит гораздо быстрее.

7.3.3 Алгоритм моделирования процессов растекания и испарения СПГ

1. Первым этапом расчета будет определение массы паров мгновенного вскипания СПГ.

Максимальная массовая скорость испарения m_0 достигается в начальный момент касания жидкостью поверхности при температуре T_0 и не зависит от типа поверхности. Значение m_0 определяется коэффициентом теплоотдачи α при пленочном режиме кипения жидкости в большом объеме, для метана $\alpha = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ [23]:

$$m_0 = \frac{\alpha(T_0 - T_{\text{кип}})}{L_{\text{исп}}} \quad (7.1)$$

где

T_0 – температура поверхности, на которую проливается СПГ,

$T_{\text{кип}}$ – температура кипения СПГ.

Так при $T_0 = 293$ К, $T_{\text{кип}} = 111$ К и $L_{\text{исп}} = 510789,6$ Дж/кг для метана, максимальная скорость испарения равна $0,107$ кг/(м²с).

При давлении в резервуаре с СПГ, близкому к атмосферному, доля массы паров мгновенного вскипания СПГ не превышает 1,5% [23] и *при проведении дальнейших расчетов на этом этапе предлагается брать эту величину.*

2. На этапе нестационарного режима воспользуемся таблицей 7.5.

В таблице 7.5 представлены *средние* значения массовых скоростей испарения жидкого метана в режимах нестационарного и квазистационарного испарения с различных поверхностей, полученные расчетным путем и откорректированные по экспериментальным данным [23].

Таблица 7.5 – Средние значения массовых скоростей испарений жидкого метана, кг/(м²с)

№ п/п	Поверхность испарения	Нестационарный режим (< 100 с)	Квазистационарный режим (>100с)
1	Бетон	0,05	0,02
2	Грунт (песчаный)	0,07	0,025
3	Вода (спокойная поверхность)	0,03	0,01

3. А далее при квазистационарном режиме для *вычисления* массовой скорости испарения $m(t)$ предлагается формула (при $t > 100$ с)

$$m(t) = \frac{\Delta T}{L_{\text{исп}}} \sqrt{\frac{\lambda \cdot c \cdot \rho}{\pi t}} \quad (7.2)$$

где

$\lambda \cdot c \cdot \rho$ – тепловая активность твердого тела (λ – теплопроводность поверхности разлития, Вт/(м К),

c – удельная теплоемкость поверхности разлития, Дж/(кг К),

ρ – плотность поверхности разлития, кг/м³),

ΔT – начальная разность температур «поверхность – жидкость»,

$L_{исп}$ – удельная теплота испарения, Дж/кг (для СПГ $L_{исп} = 510789,6$ Дж/кг).

Значения λ , c , ρ для некоторых твердых покрытий даны в таблице 7.6. В целях упрощения считается, что эти величины не зависят от температуры.

Массовая скорость испарения СПГ определяется по временным периодам (например, 101–200, 201–300, 301–600), испарившегося за время, прошедшее с момента разлива до момента локализации пролива (примем 600 с).

4. Затем находятся площадь разлива СПГ (или площадь обвалования), средняя массовая скорость испарения СПГ по указанным выше временным периодам и общая масса горючего вещества в облаке ТВС, определенная по трем этапам (1–3) испарения.

Таблица 7.6 – Теплофизические константы материалов [23]

№п/п	Материал	λ , Вт/(м К)	c , Дж/(кг К)	ρ 10 ³ , кг/м ³
1	Нержавеющая сталь	16,00	470	7,80
2	Гравий	0,36	840	1,84
3	Бетон, грунт песчаный	0,84	840	1,60
4	Вода	0,55	4200	1,00

Для сравнения в статье Кочетова Н.М. [24] масса испарившейся жидкости (аммиак) равна сумме масс мгновенно испарившейся жидкости и жидкости, испарившаяся за время, прошедшее с момента разлива до момента локализации пролива.

Доля мгновенно испарившейся жидкости $\Phi_{мг}$ от общей исходной массы жидкости M_0 определяется по формуле

$$\Phi_{мг} = \frac{c_{ж}(t_0 - t_{к})}{L_{исп} - c_{ж}t_{к}} \quad (7.3)$$

где $c_{ж}$ – удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг К),

t_0 – температура поверхности разлития СПГ,

t_k – температура кипения СПГ,

$L_{исп}$ – удельная теплота испарения, Дж/кг (для СПГ $L_{исп} = 510789,6$ Дж/кг) приведены в таблице 7.2.

В источнике [24] утверждается, что успевает испариться всего лишь половина капель жидкости, оказавшихся в аэрозольном облаке. Поэтому масса паров мгновенного вскипания $M_{мг}$ определяется по формуле

$$M_{мг} = M_0 \varphi_{мг} / 2 \quad (7.4)$$

Затем находится массовая скорость испарения вещества, испарившегося за время, прошедшее с момента разлива до момента локализации пролива. В источнике [24] представлена формула такая же, как и в источнике [23] – в отчете формула (7.2).

Однако, сравнительный анализ подходов в [23] и [24] для СПГ показывает большую разницу в определении массы паров мгновенного вскипания СПГ по формулам, предлагаемым для жидкого аммиака, что подтверждает важность учета особенностей поведения во времени СПГ при разливе.

В продолжение исследований по проекту планируется рассмотреть для более точных расчетов влияние на интенсивность испарения криогенных жидкостей в реальных условиях влажности, проницаемости грунта и скорости ветра. При просачивании жидкости в пористый грунт или слой гравия значительно увеличивается площадь соприкосновения криогенной жидкости с поверхностью пролива, в результате этого пропорционально увеличению площади растёт и эффективная массовая скорость испарения. При проливе криогенной жидкости на влажный грунт появляется дополнительный поток тепла к жидкости за счет замерзания воды. Влияние ветра на интенсивность испарения криогенных жидкостей отмечается на более поздних стадиях процесса, когда разность температур между поверхностью пролива и жидкостью становится равной 4-5°C и менее. В этот момент тепловой поток к жидкости резко падает и существенным становится поток тепла от окружающей атмосферы [23].

7.3.4 Формирование и рассеяние в атмосфере газовых облаков, образующихся при проливах СПГ

Под влиянием очень высокого уровня теплоотдачи от теплых поверхностей (земли, бетона) к разлитому СПГ, последний быстро испаряется. При смешивании паров с

воздухом образуется газоздушная смесь, которая способна воспламениться при концентрациях от 5% до 15% паров СПГ [23].

Если при разливе СПГ и его испарении с образованием газоздушной смеси в этой зоне не окажется источника открытого огня или искры, то образовавшееся газоздушное облако, хотя и содержащее огромный объем газа в концентрации, достаточной для его воспламенения, вспышки облака не произойдет и оно будет перемещаться до тех пор, пока не произойдет реакции с источником воспламенения. Если и этого не случится, то облако постепенно обретет концентрацию газоздушной смеси ниже нижнего предела воспламеняемости (примерно 5% метана в воздухе) и перестанет представлять опасность. Но, если до этого момента возникнет контакт с воспламенителем, то облако взорвется. Если такой вспышки не случится, облако понесет ветром или при отсутствии ветра оно постепенно начнет терять свою плотность и расплзаться более или менее радиально во всех направлениях.

В ходе этого процесса облако будет постепенно терять свою плотность, продолжая непрерывно насыщаться новыми объемами воздуха. Вспышка газоздушного облака может представлять опасность для персонала, населения как при прямом соприкосновении с огнем, так и от излучаемой массы термальной энергии [8].

Пример. Расчет массы испарившегося пожаровзрывоопасного облака при разливе СПГ.

В расчетах представлен вариант разлива СПГ в резервуарном парке на заводе «Ямал СПГ». На территории резервуарного парка располагаются 4 изотермических резервуара (ИР) с СПГ каждый объемом 160000 м^3 , по два резервуара в обваловании. На рисунке 7.5 представлена схема обвалования изотермических резервуаров. Каждый ИР заполнен на 95%, то есть объем жидкой фазы, в каждом из ИР равен 152000 м^3 . Резервуары обвалованы попарно, в каждом железобетонном обваловании высотой 2,5 м и площадью 80000 м^2 расположено по два ИР.

Габариты обвалования рассчитаны таким образом, чтобы при разливе всего объема ИР (152000 м^3) высота обвалования была на 0,5 м выше разлитого СПГ. Первым этапом расчета будет определение масс паров мгновенного вскипания СПГ. При давлении в резервуаре с СПГ, близкому к атмосферному, эта доля не превышает 1,5% [23].

Масса паров мгновенного вскипания СПГ $M_{\text{мг}}$ будет равна 980,4 т.

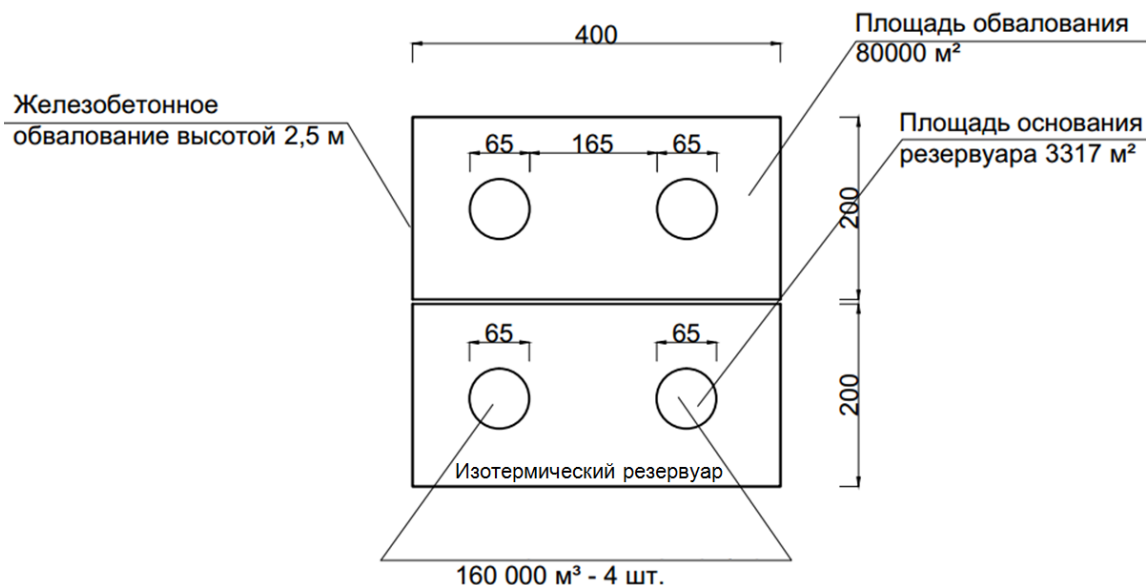


Рисунок 7.5 – Схема обвалования изотермических резервуаров

На втором этапе определяется масса испарившегося СПГ за время, прошедшее с момента разлива до момента локализации пролива. Для этого необходимо определить площадь испарения и интенсивность испарения. Так как в обваловании находятся два ИР, то площадь испарения при полном разрушении одного из ИР равна площади обвалования без учета площади основания резервуара.

Площадь испарения рассчитывается по формуле

$$S = ab - \pi R^2 \quad (7.5)$$

где

a, b – длины сторон обвалования, м,

R – радиус основания резервуара, м.

$$S = 76683 \text{ м}^2.$$

Объем разлитого СПГ равен $152\,000 \text{ м}^3$. Находим толщину разлива:

$$H = \frac{V}{S} \quad (7.6)$$

где

H – толщина разлива, м,

V – объем разлитого СПГ, м^3 ,

S – площадь пролива (площадь обвалования), м^2 .

$$H = \frac{152000 \text{ м}^2}{76683 \text{ м}^2} = 1,98 \text{ м.}$$

Высоту обвалования принимаем как высоту пролива (1,98 м) плюс 0,5 м [34].

Следующим этапом расчета будет нахождение массовой скорости испарения СПГ $m(t)$ по формуле (7.1). В данной формуле все значения будут постоянными, кроме времени. В таблице 7.7 представлены постоянные параметры, необходимые для нахождения скорости испарения по формуле (7.2).

Таблица 7.7 – Постоянные параметры для нахождения массовой скорости испарения СПГ

Наименование	Обозначение	Размерность	Значение
Теплопроводность (бетон)	λ	Вт/(м К)	1,7
Удельная теплоемкость (бетон)	c	Дж/(кг К)	880
Плотность (бетон)	ρ	кг/м ³	2500
Удельная теплота испарения	$L_{\text{исп}}$	Дж/кг	510789,6
Разность температур поверхности разлития и жидкости	ΔT	К	182

Подставив данные в формулу (7.2), получили значения массовой скорости испарения СПГ. Так как формула (7.2) не корректна для расчетов массовой скорости испарения при $t < 100$ с, то примем среднюю массовую скорость испарения в первые 100 секунд испарения равной $0,05 \text{ кг/м}^2$ по таблице 7.5 [23].

Результаты расчетов представлены в таблице 7.8.

Полученная зависимость массовой скорости испарения СПГ от времени после разлития (на бетонное покрытие) приведена на рисунке 7.6.

Таблица 7.8 – Результаты расчета массовой скорости испарения СПГ $m(t)$ и массы пожаровзрывоопасного облака

№ п/п	Время испарения, с	Массовая скорость испарения, кг/м ² с	Средняя массовая скорость испарения, кг/м ² с	Масса пожаровзрывоопасного облака при общем обваловании, т
1	1-100	-	0,05	383,4
2	110	0,037	0,0316	242,3
3	120	0,035		
4	130	0,034		
5	140	0,033		
6	150	0,032		
7	160	0,031		
8	170	0,030		
9	180	0,029		
10	190	0,028		
11	200	0,027		
12	210	0,027		
13	220	0,026		
14	230	0,025		
15	240	0,025		
16	250	0,025		
17	260	0,024		
18	270	0,024		
19	280	0,023	0,0244	187,1
20	290	0,023		
21	300	0,022		
22	320	0,022	0,0191	439,4
23	340	0,021		
24	360	0,021		
25	380	0,020		
26	400	0,020		
27	420	0,019		
28	450	0,018		
29	500	0,017		
30	550	0,017		
31	600	0,016		

Масса испарившегося СПГ в зависимости от времени испарения будет равна через 300 с – 1793,2 т; через 600 с – 2232,6 т. На рисунке 7.6 представлен график зависимости массовой скорости испарения СПГ от времени после разлития.

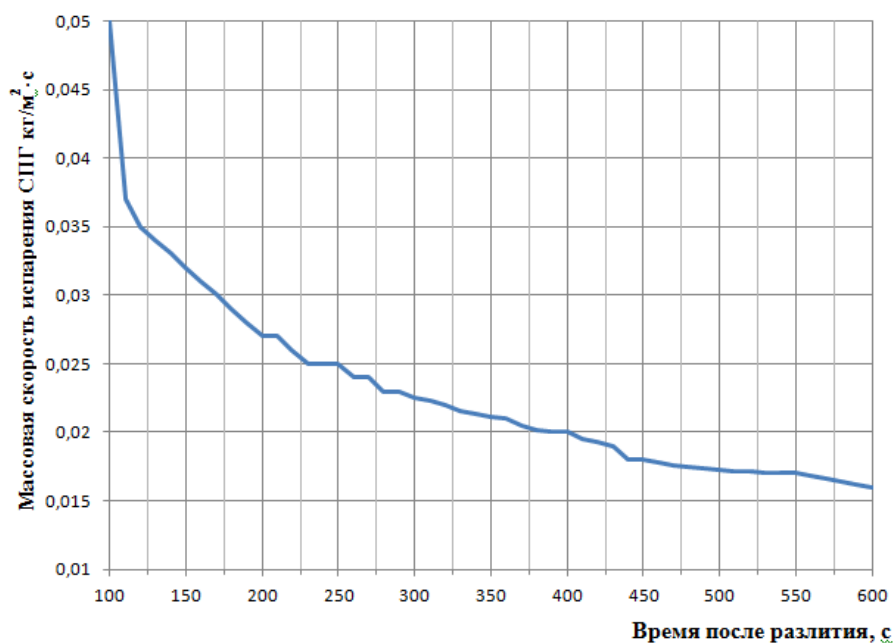


Рисунок 7.6 – График зависимости массовой скорости испарения СПГ от времени после разлития (на железобетонное покрытие)

Как показано Сафоновым В.С. [21] (рисунок 7.7), при аварийных разливах СПГ на грунтах и различных строительных покрытиях в рамках классических механизмов кондуктивной теплопередачи, включая задачи фазового перехода типа задачи Стефана, теплоприток от подстилающей поверхности к СПГ убывает пропорционально $\tau^{-1/2}$ и для характерных теплофизических характеристик грунтов и строительных покрытий уже через 2–3 мин. составляет $0,04...0,07 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, а для теплоизолирующих покрытий – меньше, чем $0,005 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ (изломы кривых на рисунке 7.7 связаны с переходом от пленочного к пузырьковому режиму кипения).

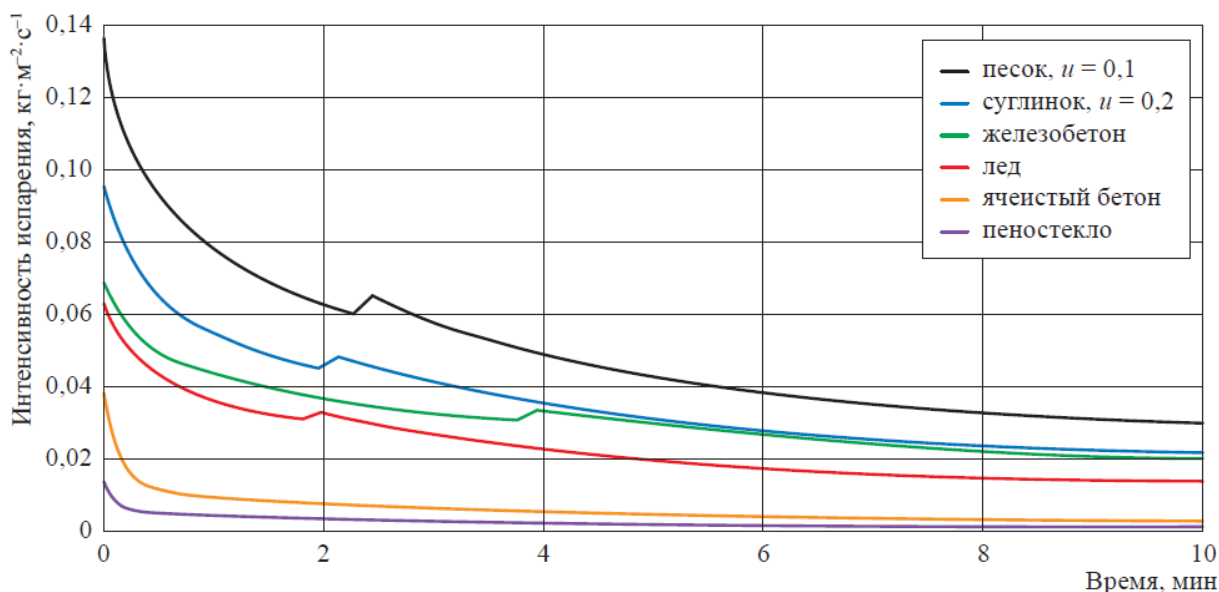


Рисунок 7.7 – Зависимость интенсивности испарения СПГ на различных непроницаемых покрытиях от времени

Сравнение полученного графика (рисунок 7.6) с графиком (рисунок 7.7) подтверждает возможность использования предлагаемой методики оценки массы испарившегося пожаровзрывоопасного облака при разливе СПГ.

7.3.5 Оценка зон поражения в программных комплексах TOXI+RISK И ALOHA

После определения массы испарившегося пожаровзрывоопасного облака при разливе СПГ определяются зоны поражения при пожаре разлива, взрыве ТВС СПГ.

В России наиболее используемым сертифицированным программным продуктом является TOXI+Risk, который предназначен для проведения расчетов последствий аварий с выбросом опасных веществ, количественной оценки риска и других задач [39].

Наиболее известными программными комплексами для оценки рисков нефтегазодобывающих, химических, нефтехимических производств мире являются DNV GL's Safety и FLACS-Risk [12 -14], PC ALOHA [41, 42].

PC ALOHA является сертифицированным зарубежным продуктом анализа зон поражения, находящимся в свободном доступе к загрузке в сети интернет. В иностранных источниках представлены результаты использования зарубежного программного обеспечения ALOHA для оценки зон поражения и прогнозирования ЧС.

Представлен сравнительный анализ программных продуктов для оценки зон поражения и прогнозирования чрезвычайных ситуаций – отечественного программного обеспечения TOXI+Risk, 4.3.0 и зарубежного программного обеспечения ALOHA 5.4.6. Оба ПК оценивают зоны поражения в результате химических выбросов.

ПК ALOHA предназначен для моделирования химических выбросов для аварийно-спасательных служб и проектировщиков. Его основная задача заключается в обеспечении персонала инструментом для реагирования на чрезвычайные ситуации, связанные с проливами химических веществ. ALOHA также является полезным инструментом для обучения и планирования действий в случае возникновения аварий.

ALOHA позволяет вводить данные о реальных или потенциальных выбросах химических веществ и затем создавать зоны поражения для различных типов чрезвычайных ситуаций. ALOHA моделирует облака ядовитого газа, облака горючего газа, BLEVE (взрывы расширяющихся паров кипящей жидкости), факельное горение, пожар пролива и взрывы топливно-воздушной смеси [9, 11, 15–18].

Отечественный ПК TOXI+Risk предназначен для оценки последствий аварийных выбросов опасных веществ и анализа риска аварий, который используется при проектировании и декларировании промышленной и пожарной безопасности.

Оценка зон поражения является частью управления техногенной безопасностью потенциально опасных объектов и территорий в современных условиях. Он может выполняться как в программном обеспечении TOXI+Risk, которое позволяет вычислять зоны поражения, и в частности риск, и в программном обеспечении ALOHA, которое применяется для определения зон поражения.

Анализ зон поражения показал, что максимальное расхождение в размерах зон поражения достигает 30 %.

Преимуществом программного обеспечения ALOHA является база данных более 1000 химически опасных веществ, включая смеси веществ, удобный графический интерфейс, свободный доступ к загрузке программного обеспечения. Это позволяет проводить научно-исследовательские работы, расширенные до анализа эффекта домино для критических инфраструктур, оценки риска и выработки действий по управлению этим риском.

Модель дисперсии в ПК ALOHA. Существуют две отдельные модели рассеяния опасных веществ в ALOHA: Гауссовская модель (Gaussian) и модель для тяжелого газа (Heavy Gas). Облако газа, которое является более плотным или тяжелее воздуха (так называемый тяжелый газ) также может распространяться в небольшой степени против ветра.

ALOHA моделирует рассеяние облака загрязняющего газа в атмосфере и после расчета отображает диаграмму, которая показывает вид сверху область, в которой концентрация газа будет достигать опасных уровней. Эта диаграмма называется след облака.

Для получения следа облака, сначала необходимо определить порог концентрации в воздухе загрязняющих веществ, как правило, это концентрация, выше которой газ может представлять опасность для людей.

След представляет собой область загрязняющего газа, в которой концентрация на уровне земли, по прогнозам, превышает уровень опасности в какой-то момент после начало выброса.

Расчеты рассеивания тяжелого газа в ПК ALOHA. Расчеты рассеивания для тяжелых газов, использующиеся в ALOHA, основаны на модели DEGADIS (Spicer and Havens 1989), одной из нескольких хорошо известных моделей тяжелых газов. Эта модель была выбрана из-за ее общего признания и всесторонних испытаний, проведенных её авторами.

Для того чтобы ускорить вычислительные процедуры и уменьшить потребность в исходных данных, которые, как правило, трудно получить во время аварийного выброса, несколько упрощений были введены в модель ALOHA-DEGADIS, что делает её отличной от модели DEGADIS. Эти упрощения включают в себя:

- модель ALOHA-DEGADIS предполагает, что все выбросы тяжелого газа происходят на уровне земли,
- математические процедуры приближения, используемые для решения уравнения модели более быстрые, но менее точные, чем те, которые используются в DEGADIS,
- ALOHA-DEGADIS модель источника, для которого изменения скорости высвобождения с течением времени как серия коротких, устойчивых выбросов, вместо ряда отдельных точечных импульсных источников.

В тех случаях, когда требуется техническая точность, следует построить оригинальную модель DEGADIS и использовать ее для изучения сценариев, представляющих интерес.

ALOHA может автоматически выбрать, следует ли прогнозировать дисперсию химического вещества в качестве гауссовой или модели тяжелого газа (он основывает этот выбор в основном по молекулярному весу, размеру выброса, и температуре газового облака). ALOHA позволяет выбрать модель дисперсии.

В частности, если химическое вещество с молекулярной массой меньше, чем у

воздуха хранится при низкой температуре или под высоким давлением, то оно может вести себя как тяжелый газ (аммиак является примером такого химического вещества).

При выборе одного из этих химических веществ, в зависимости от модели его выброса, ALOHA может не иметь достаточно информации о выбросе, чтобы определить, может ли быть сформирован тяжелый газ.

В таком случае, ALOHA выполнит расчеты по гауссовской модели рассеяния, но выведет предупреждение по рекомендации запуска расчетов по модели тяжелого газа. Для этого нужно повторно запустить расчет ALOHA для вычисления модели тяжелого газа и произвести оценку двух зон.

ПК ALOHA предназначен для прогнозирования опасностей, связанных с масштабными проливами, для которых характерны аварии с резервуарами, транспортные происшествия. Он применяется для моделирования выбросов химических веществ с зонами поражения от 10 до 10000 м со временем экспозиции до одного часа, позволяет сравнивать результаты расчета при изменении атмосферных условий, обладает высокой скоростью расчетов.

Преимуществом TOXI+Risk является оценка риска потенциально опасных объектов. Одним из недостатков заключается в невозможности экспортировать зоны в геоинформационные системы, соответственно, подбирая масштаб изображения карт в режиме онлайн. Кроме того, высокая стоимость продукта по сравнению с ПК ALOHA является препятствием его использования.

В ALOHA и TOXI+Risk заложены разные критерии опасностей. В ALOHA – это AEGLs (Acute Exposure Guideline Levels), ERPGs (Emergency Response Planning Guidelines), PACs (Protective Action Criteria), IDLH (Immediate Danger to Life and Health). Наиболее широко используемыми являются уровни AEGLs. TOXI+Risk для оценки уровня опасности при химическом поражении использует пороговую и смертельную токсодозу.

В настоящем исследовании в таблице 7.9 приведена сравнительная оценка зарубежного программного комплекса ALOHA и отечественного программного комплекса TOXI+Risk по оценке риска аварийных событий и прогнозированию опасностей.

Таблица 7.9 – Сравнение основных возможностей ПК TOXI+Risk, TOXI, модуль «Взрыв ТВС», ПК ALOHA [35, 36]

Критерий сравнения	TOXI+Risk 4.3.0	TOXI	Модуль «Взрыв ТВС»	ALOHA
Учет атмосферных условий	✓	✓	✗	✓
База данных химических веществ	✓ ≈50	✓	✓	✓ >1000
Расчет жидких и газовых веществ	✓	✓	✓	✓
Учет географических данных	✓	✓	✗	✓
Расчет параметров истечения	✓	✓	✗	✓
Учет параметров местности	✓	✓	✓	✓
Учет параметров поверхности пролива	✓	✓	✗	✓
Расчет параметров пролива	✓	✓	✗	✓
Учет параметров оборудования	✓	✓	✗	✓
Учет сведений о сценарии аварии	✓	✓	✗	✓
Расчет тяжелых ¹ газов	✓	✓	✓	✓
Нанесение зон поражения	✓	✓	✓	✓
Возможность экспорта ситуационных планов	✓	✓	✓	✓ ²
Учет направления ветра	✓	✓	✗	✓
Расчет показателей риска	✓	✗	✗	✗
Расчет последствий воздействия ударных волн при взрыве ТВС	✓	✗	✓	✓
Расчет последствий при пожарах	✓	✗	✗	✓
Высокая скорость расчетов в ПК	✗	✓	✓	✓
Создание новых веществ	✓	✓	✓	✓
Расчет смеси веществ (азотная, соляная, ортофосфорная кислота, аммиачная вода)	✗	✗	✗	✓
Удобство визуального представления	✗	✗	✗	✓
Графический интерфейс	✓ ³	✓	✓	✓

¹ – Газы тяжелее воздуха.

² – Зоны угрозы ALOHA могут быть отображены на картах в MARPLOT®, другой программы в семействе CAMEO. Зоны поражения также могут быть показаны в Google Earth или Google Maps, используя функцию экспорта Esri's ArcMap, используя ALOHA ArcMap.

³ – TOXI+Risk имеет расширенный графический интерфейс в сравнении с ALOHA.

7.3.6 Оценка зон поражения при авариях на ПОО с СПГ в ПК TOXI+RISK и ALOHA

Представлен сравнительный анализ программных продуктов для оценки зон поражения и прогнозирования чрезвычайных ситуаций – отечественного программного обеспечения TOXI+Risk 4.3.0 и зарубежного программного обеспечения ALOHA 5.4.6 в [35, 36].

Пример. Пожар пролива сжиженного природного газа.

При проливе СПГ и наличии источника зажигания может произойти воспламенения поверхности пролива. Пожар пролива сжиженного природного газа рассчитывается в двух программных продуктах. Исходные данные к расчетам показаны в таблице 7.10. Зоны теплового воздействия при пожаре пролива СПГ в программном обеспечении TOXI+Risk и ALOHA показаны на рисунке 7.9.

Таблица 7.10 – Пожар пролива сжиженного природного газа

Параметры расчета	Исходные данные
Температура окружающей среды	20 °С
Модель	Пожар пролива
Общий объем выброса	4225 кг
Температура вещества	-161.5° С

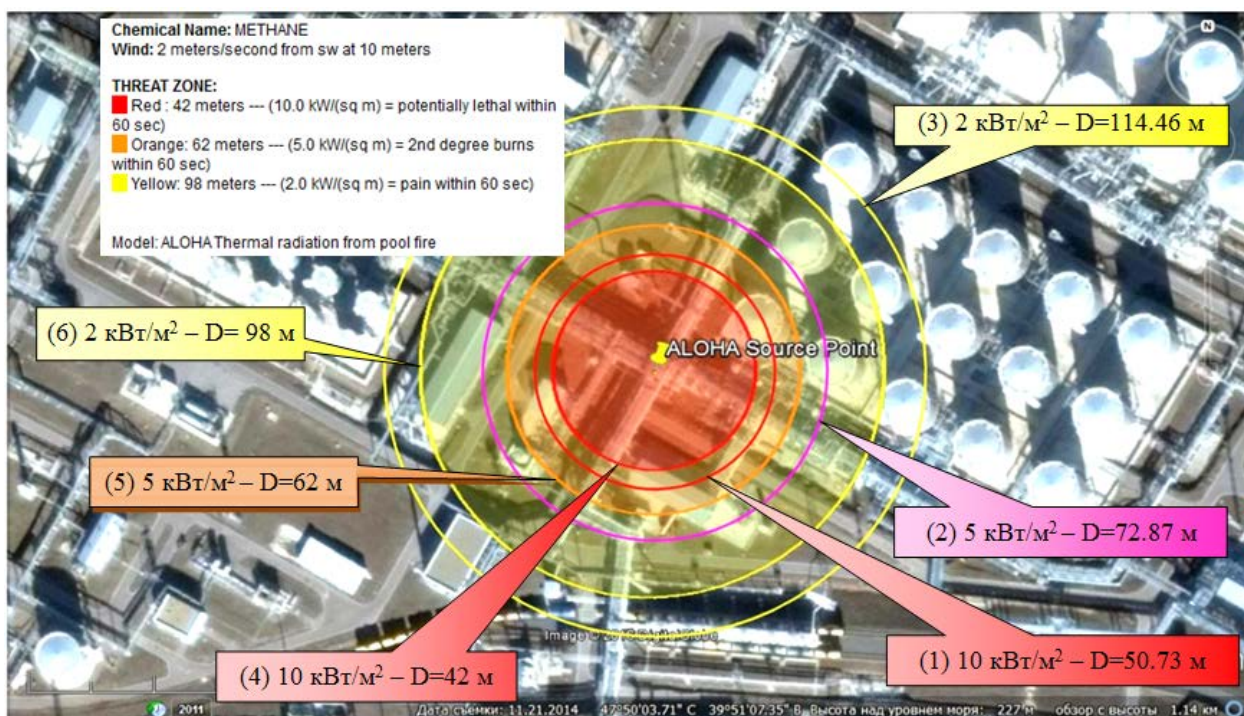


Рисунок 7.9 – Зоны поражения при пожаре пролива СПГ в TOXI+Risk (1, 2, 3) и ALOHA (4, 5, 6) (1) и (4) – 21%, (2) и (5) – 18%, (3) и (6) – 17%

Здесь и далее проценты, указанные в скобках, несоответствия между результатами оценки площадей от воздействия химических веществ при авариях, рассчитанных в TOXI+Risk и ALOHA.

ПК TOXI+Risk выдает зоны, большие, чем зоны поражения. По результатам расчета потенциальная смерть в течение 60 с наступает в зоне диаметром 50.73 м, ожоги 2-й степени в течение 60 с возникнут на расстоянии 72.87 м, боль в течение 60 с наступает на расстоянии 114 м.

Пример. Взрыв ТВС сжиженного природного газа

Предполагалось, что при аварии возникает облако топливно-воздушной смеси и ее последующий взрыв. В таблице 7.11 указаны основные параметры, используемые для расчета взрыва ТВС СПГ в ПК ALOHA.

В программном комплексе TOXI+Risk нет в базе веществ СПГ, надо создавать это вещество в отличие от ПК ALOHA.

Таблица 7.11 – Основные параметры для расчета взрыва ТВС СПГ

Тип вещества	METHANE
Химические данные	
Молекулярная масса	16.04 g/mol
Критерии PAC ((Protective Action Criteria)	PAC-1: 65000 ppm PAC-2: 230000 ppm PAC-3: 400000 ppm
Нижний/верхний концентрационные пределы воспламенения	LEL: 50000 ppm /UEL: 150000 ppm
Температура вещества	-161.5° C
Давление в оборудовании	1,1 atm
Атмосферные условия	
Скорость ветра	2 meters/second
Направление ветра	SE
Высота измерения скорости ветра	10 m
Температура воздуха	20° C
Класс устойчивости атмосферы	B
Влажность	50 %
Облачность	5 tenths
Тип шероховатости поверхности	open country
Данные об источнике выброса	
Общий объем источника	100 cubic meters
Агрегатное состояние вещества	Liquid
Температура внутри источника	-161,5° C
Продолжительность выброса	1 minute
Скорость выброса	704 kilograms/sec
Общий объем выброса	42,253 kilograms

Данное химическое вещество может быть кипящей жидкостью и/или двухфазной смесью. Для оценки потенциального поведения следует произвести расчет для ALOHA GAUSSIAN и ALOHA HEAVY GAS и двух типов зажигания: искра и детонация.

1. Тип зажигания – детонация, модель Gaussian.

На рисунке 7.10 показан взрыв ТВС СПГ при использовании гауссовской дисперсии и типа зажигания детонация.

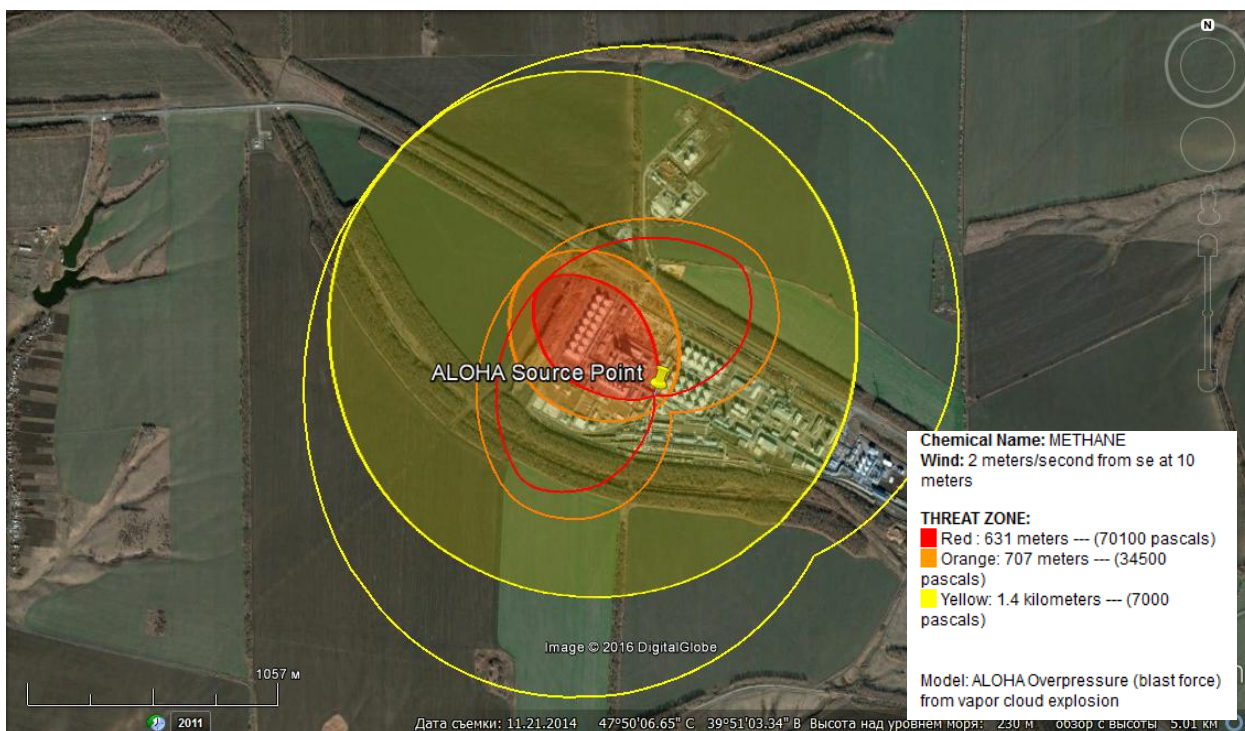


Рисунок 7.10 – Взрыв ТВС СПГ в ПК ALOHA

При взрыве ТВС диаметр разрушения остекления составляет 1,4 км, зона сильного разрушения составляет 707 м, зона полного разрушения 631 м.

2. Тип зажигания – искра/пламя, модель Gaussian.

На рисунке 7.11 показан взрыв ТВС СПГ в ПК АЛОНА.

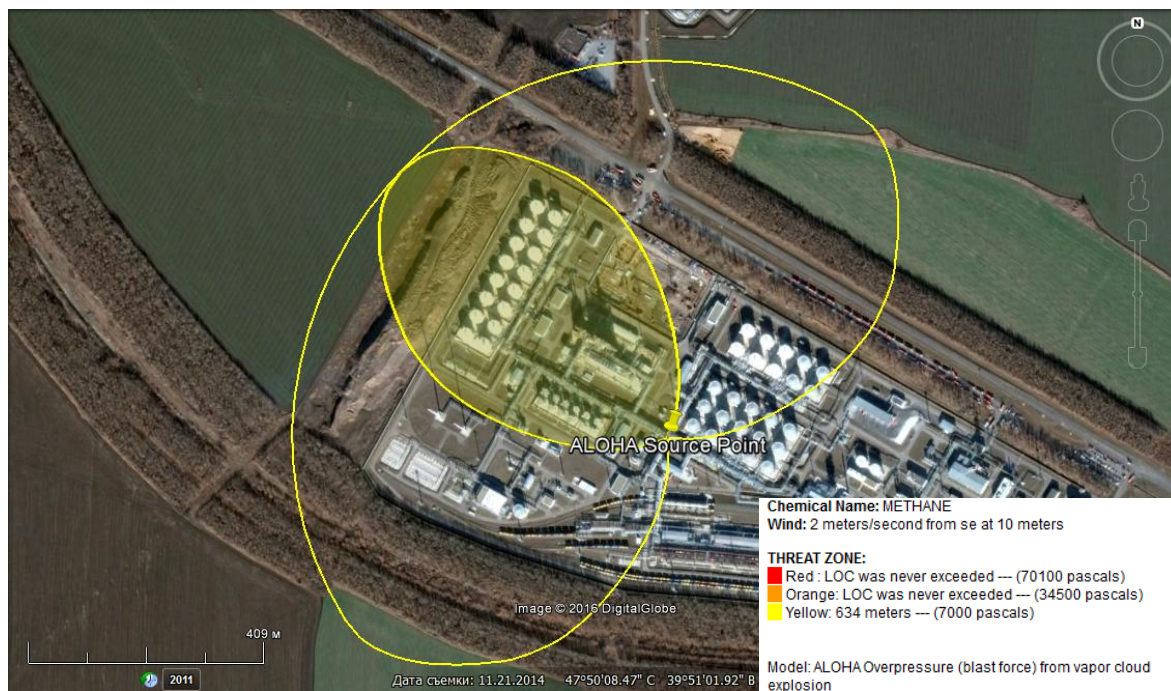


Рисунок 7.11 – Взрыв ТВС СПГ в ПК АЛОНА

При взрыве ТВС СПГ в данном случае давление, при котором происходят серьезные и полные разрушения зданий, не достигается. Размер зоны полного разрушения остекления – 634 м.

3. Тип зажигания – детонация, модель Heavy Gas.

На рисунке 7.12 показан взрыв ТВС СПГ при использовании модели тяжелого газа и типа зажигания детонация.

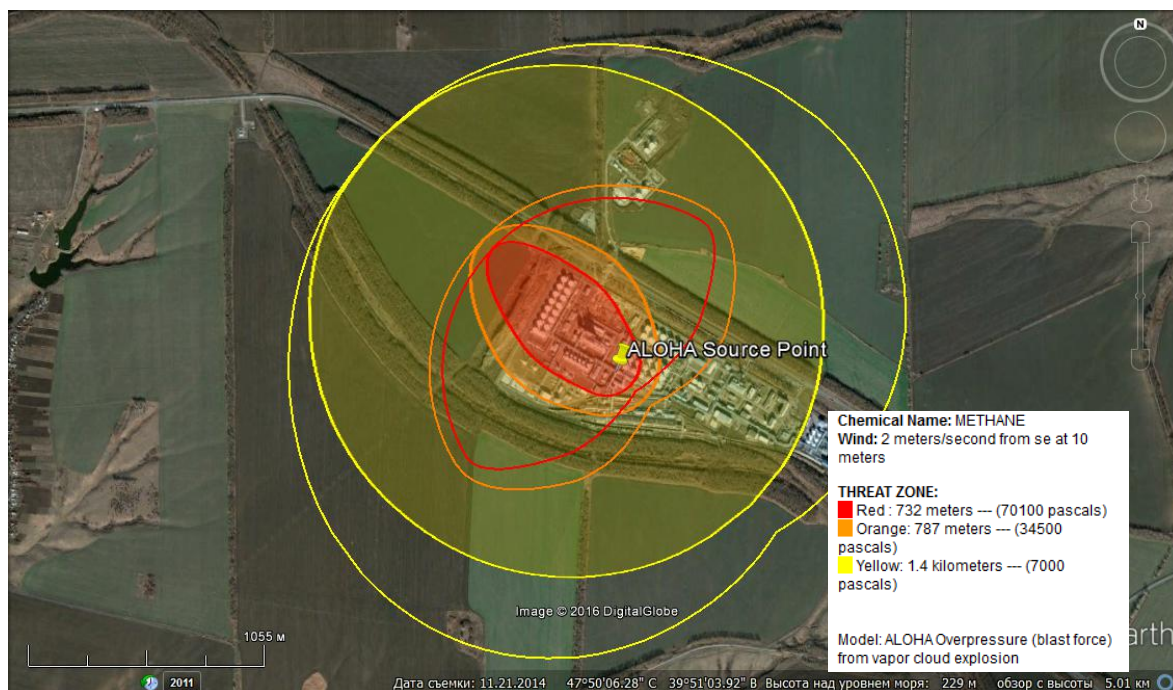


Рисунок 7.12 – Взрыв ТВС СПГ в ПК ALOHA

Данный сценарий взрыва ТВС СПГ является наиболее опасным: зона полного разрушения зданий достигает 732 м, зона серьезных разрушений – 787 м, зона полного разрушения остекления – 1,4 км. В случае аналогичного расчета по модели ALOHA GAUSSIAN различие в размерах зон поражения с моделью ALOHA HEAVY GAS 11–14 % – по полным и серьезным разрушениям, одинаковый размер зон полного разрушения остекления.

4. Тип зажигания – искра/пламя, модель Heavy Gas.

На рисунке 7.13 показан взрыв ТВС СПГ при использовании модели тяжелого газа и типа зажигания детонация.

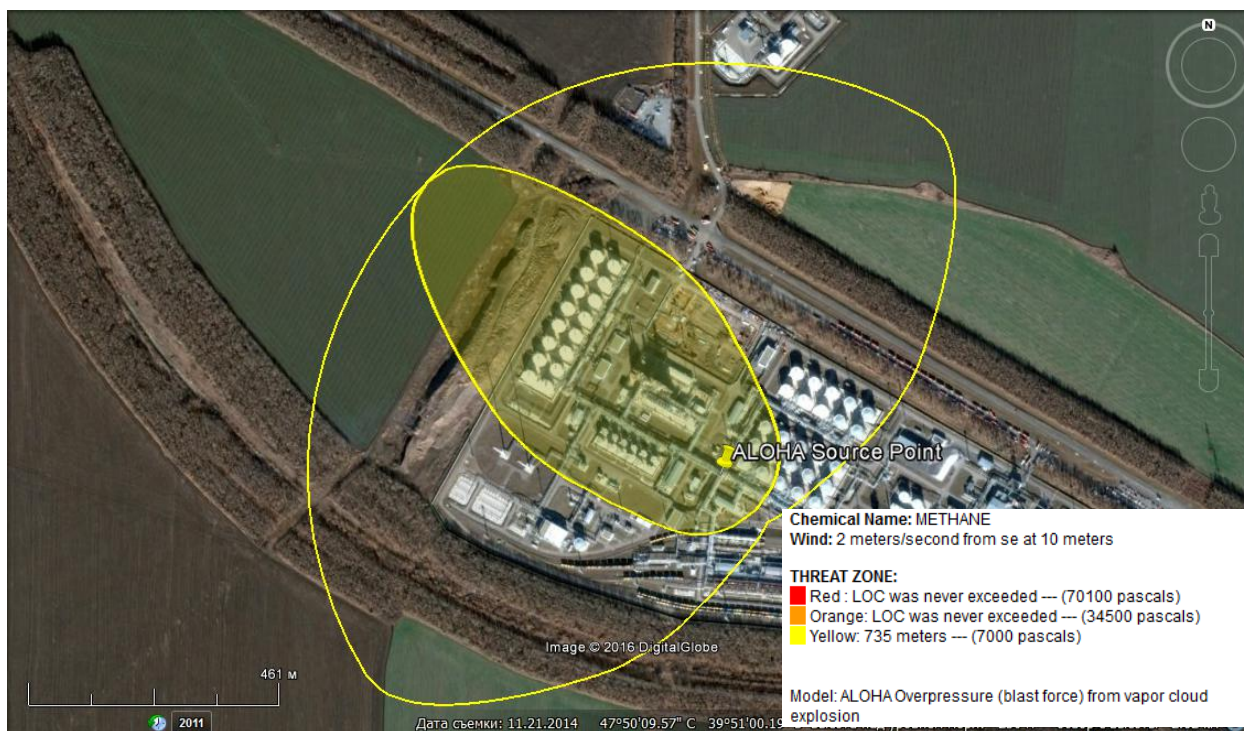


Рисунок 7.13 – Взрыв ТВС СПГ в ПК ALOHA

Зоны полного и серьезного разрушения зданий не достигаются, размер зоны полного разрушения остекления – 735 м.

В результате данного исследования произведена комплексная оценка зон поражения с использованием ПК TOXI+Risk и ПК ALOHA. Сравнение расчетов показало допустимые пределы несоответствия между результатами оценки площадей токсического и взрывного воздействия (от 7 до 30% в зависимости от сложности модели и исходных данных). Программное обеспечение ALOHA может быть активно использовано в практических целях для прогнозирования и оценки чрезвычайных ситуаций.

7.3.7 Оценка каскадного развития аварий

Краткая статистическая информация. Постоянно возрастающая тенденция к анализу и оценке рисков каскадных аварий, более известных как аварии с эффектом «домино», обосновывается тем, что каскадные аварии хоть и являются редким событием,

но приводят к катастрофическим последствиям. Наиболее серьезные по ущербу аварии, произошедшие за последние несколько десятилетий, были вызваны именно каскадными авариями.

Общие причины возникновения «эффекта домино» в странах Евросоюза, развивающихся странах и в остальном мире приведены на рисунке 7.14 [44].

В странах Евросоюза наиболее частой причиной возникновения «домино» являются механические повреждения (38%), в развивающихся странах – также механические повреждения (38%), в остальном мире – внешние воздействия (33%) и человеческий фактор (33%).



Рисунок 7.14 – Общие причины возникновения «эффекта домино»

Потенциальные последствия аварий с эффектом «домино» на перерабатывающих предприятиях, по сравнению с другими инфраструктурами, могут быть значительно серьезнее, ввиду наличия взрывопожароопасных и токсических веществ. Исходя из повсеместной распространенности данных инфраструктур на территории Российской Федерации, повышенное внимание следует уделить предприятиям, которые хранят и перерабатывают углеводороды в больших объемах.

Оценке развития каскадных аварий посвящено значительное количество зарубежных статей. Практически ни один зарубежный журнал по риску, безопасности, надежности сложных технических систем не пропускает тему «домино-эффекта» на потенциально опасных объектах (ПОО).

Большая часть всех по оценке каскадного развития аварий исследований проводится с использованием программ, использующих вероятностно-статистический аппарат. До настоящего времени в отечественных сертифицированных программных продуктах отсутствуют утвержденные методики, рекомендованные для практического использования при анализе риска развития каскадных аварий.

Любое предприятие по хранению и переработке углеводородов несет собой угрозу возникновения пожара или повреждения резервуара с содержимым, в этом случае данная первичная авария может распространиться на соседние резервуары и технологические блоки. Повышенная обеспокоенность к событиям такого рода требует разработки средств по предупреждению, контролю и смягчению последствий каскадных аварий. Предупреждение, контроль и смягчение последствий каскадных аварий могут быть достигнуты принятием нескольких уровней безопасности, введением различных барьеров безопасности, а также прогнозированием последствий с помощью методик оценки риска, учитывающих вероятность каскадного развития аварий.

Комбинация чрезвычайно низкой вероятности возникновения эффекта «домино», высокой сложности и взаимозависимости технологических систем делает оценку техногенного риска очень сложной и трудоемкой процедурой. Из-за сложности реализации и применения на практике количественной оценки риска каскадных аварий, зачастую вероятность эффекта «домино» рассматривается качественно. Из-за характера получаемых результатов, качественные методы несут низкую практическую значимость и не позволяют прогнозировать каскадные аварии должным образом.

На основании 224 проанализированных аварий, ниже представлены данные по участвующим в авариях веществам (таблица 7.12), причинам аварий (таблица 7.13), отраслям (рисунок 7.15), типам транспортирования, в процессе которых произошла авария с эффектом домино (рисунок 7.16), типам возникших пожаров (рисунок 7.17), типам взрывов (рисунок 7.18), классификации веществ (рисунок 7.19), типу инициирующего события (рисунок 7.20), уровням эскалации (рисунок 7.21) [44, 46].

Таблица 7.12 – Наиболее частые вещества, участвующие в эффекте «домино»

Вещество	Число аварий	Процент от числа аварий, %
1	2	2
Сжиженные углеводороды	60	26,7
Нефть	25	11,1
Бензин	24	10,7

Продолжение таблицы 7.12

1	2	2
Лигроин	14	6,2
Дизельное топливо	12	5,3
Толуол	9	4
Винилхлорид	9	4
Этилен	8	3,6
Этиленоксид	7	3,1
Природный газ	7	3,1
Хлор	7	3,1
Метанол	6	2,7

Таблица 7.13 – Причины инициирующего события в авариях с эффектом «домино»

Причина	Число аварий	Процент от числа аварий, %
Внешнее воздействие	69	30,7
Механический отказ	65	28,9
Человеческий фактор	47	20,9
Ударное влияние	40	17,8
Опасная химическая реакция	21	9,3
Ошибка прибора	8	3,6
Нарушение условий производства	5	2,2
Ошибка в обслуживании	3	1,3

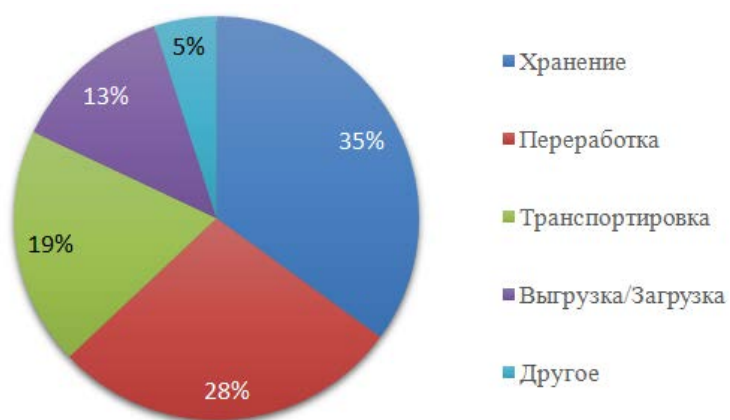


Рисунок 7.15 – Отрасли, где произошли аварии с эффектом «домино»

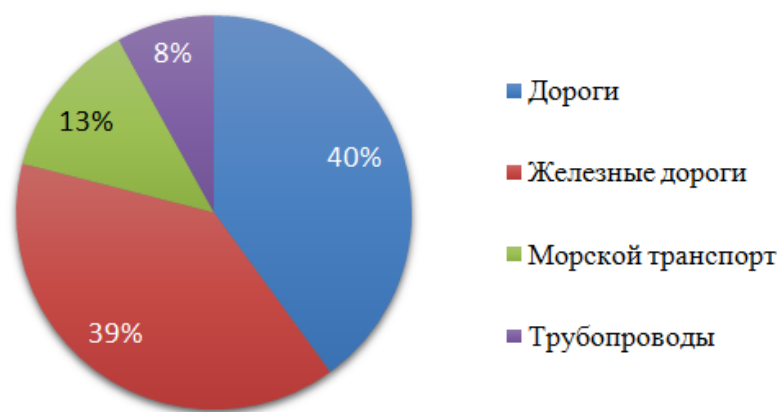


Рисунок 7.16 – Типы транспортировки, при которых произошли аварии с эффектом «домино»

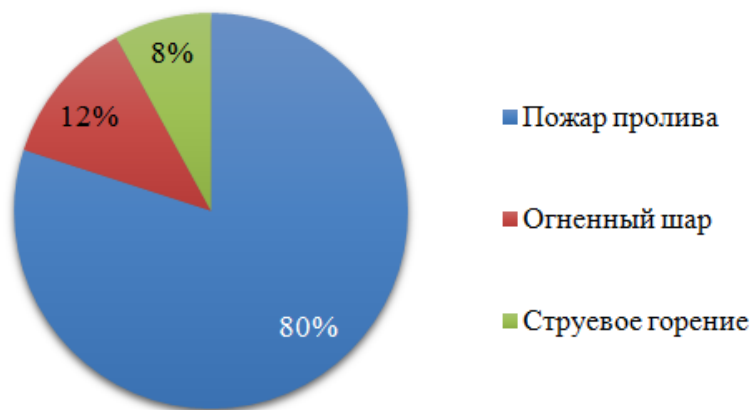


Рисунок 7.17 – Типы пожара, участвующие в эффекте «домино»



Рисунок 7.18 – Типы взрыва, участвующие в эффекте «домино»

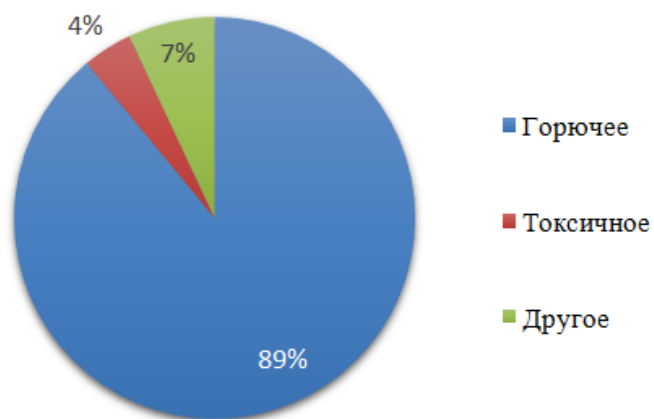


Рисунок 7.19 – Классификация веществ, участвующих в эффекте «домино»

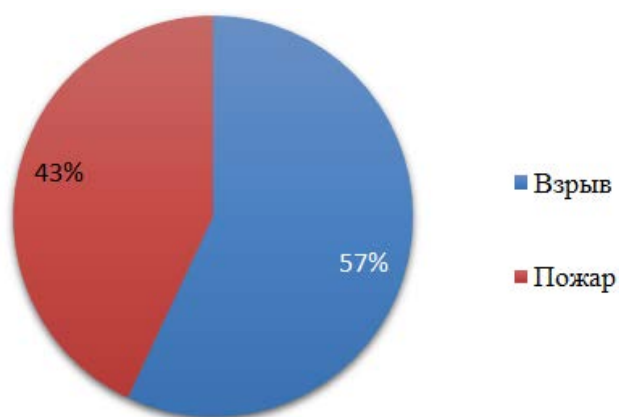


Рисунок 7.20 – Тип инициирующего события, которое привело к эффекту «домино»



Рисунок 7.21 – Уровни эскалации, из которых состоял эффект «домино»

Анализируя представленные выше данные (таблицы 7.12–7.13, рисунки 7.15–7.21) можно сделать следующие выводы:

- в авариях с эффектом «домино» в большинстве случаев участвуют углеводороды и их производные,
- главной причиной произошедших аварий является внешнее воздействие на оборудование, затем механический отказ оборудования и человеческие ошибки;
- 81% аварий произошел на стационарных объектах,
- риск возникновения «домино» аварии одинаков как при дорожных, так и при железнодорожных перевозках,
- пожар пролива является главным инициирующим событием,
- в сценариях со взрывом преобладает взрыв с участием топливоздушная смеси (взрыв ТВС),
- почти 90% веществ, участвующих в каскадных авариях, являются горючими, тогда как токсичные вещества занимают всего 4%,
- более половины аварий ограничиваются лишь первым уровнем эскалации.

Отдельного внимания заслуживают данные [45] по распределению «домино» аварий по годам (рисунок 7.22).

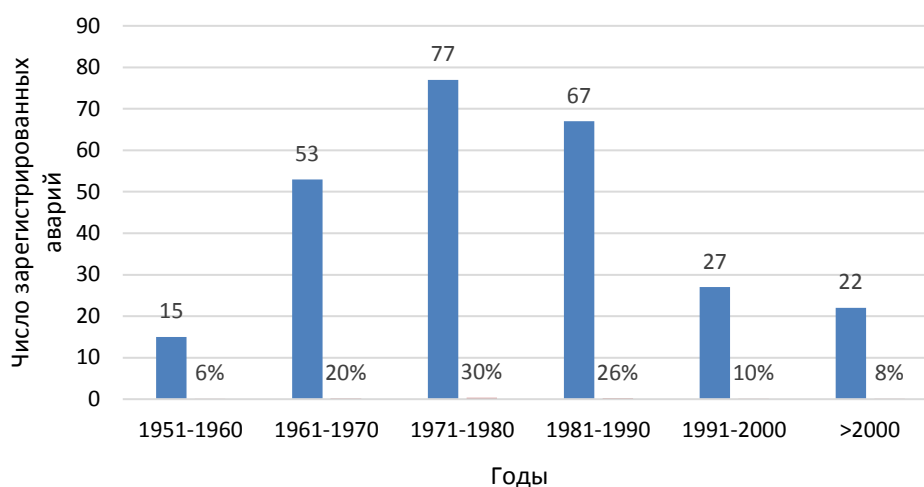


Рисунок 7.22 – Распределение аварий с эффектом «домино» по годам

7.3.8 Моделирование каскадных аварий и графическое построение визуальных моделей зон поражения

В настоящем исследовании предлагается использовать практическую экспресс-методику оценки зон поражения при каскадных авариях на основе расчетного и графического модулей отечественного сертифицированного ПК «Токси+риск» или РС «АЛОНА», дополненных алгоритмом построения карт «опасности» домино – эффекта

ПОО с использованием ГИС-технологий [47]. Алгоритм состоит в том, что на первом этапе проводятся расчеты зон поражения по ПК «Токси+риск», затем строятся графики зависимостей интенсивности излучения и силы взрыва от расстояния до источника опасности (эпицентра аварии), на которые наносятся соответствующие критериальные прямые. Кроме стандартного построения, предусмотренного «ПК Токси+риск», строятся графики зависимостей трех параметров – интенсивности излучения, взрыва, расстояния и времени (этот параметр добавляется).

Из полученных графиков визуально определяется, с какого момента времени, на каком расстоянии от эпицентра аварии (разрушенного резервуара) возникнет каскадный эффект, задается интервал «тревоги».

Завершающим этапом является построение карт «опасности», на которых наносятся по оси ox (расстояние от эпицентра аварии) все объекты, включая объекты воздействия, на которых отсутствуют опасные вещества (рисунок 7.23).

Графический анализ позволяет по карте «опасности» проанализировать реальную картину для всех составляющих объекта, соседних объектов, попадающих в зоны поражения; возможность домино-переходов; дать оценку времени до каскадного развития аварии; определить переходы на верхние уровни развития аварий.

Оценка риска каскадного развития аварии по визуально-графической методике является двусторонней. С одной стороны, карты опасности позволяют сделать вывод о зонах поражения. С другой стороны, наглядное графическое представление аварии с пороговыми критериальными значениями (интенсивность теплового излучения или барическое воздействие) дает возможность оценить развитие соответствующего «эффекта домино». На графике можно отображать как критерии поражения, так и пробит-функции. Такое представление помогает оценить последствия аварии более полно.

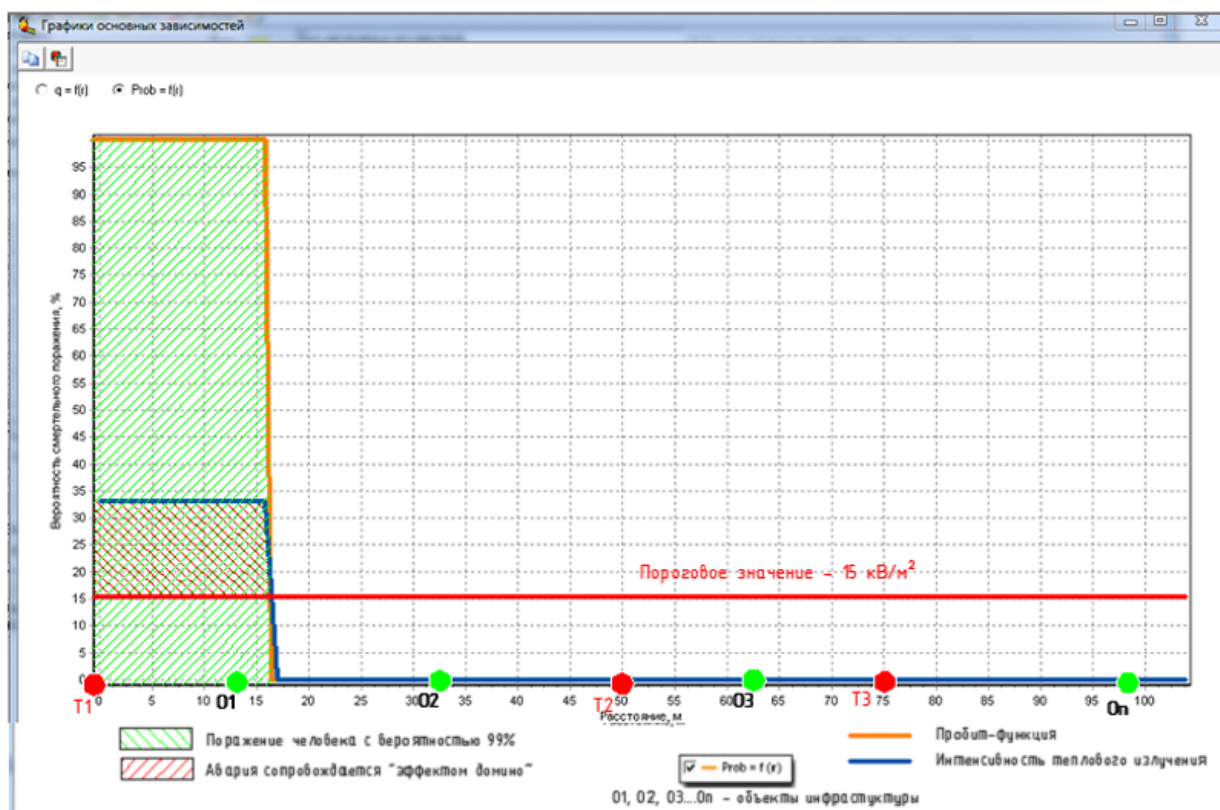


Рисунок 7.23 – Визуально-графический метод представления (развития) каскадной аварии

При необходимости уточнения оценки каскадного развития аварий предлагается использовать ранее разработанную методику в рамках НИР за 2018 г. [48].

7.4 Заключение к разделу 7

Степень выполнения поставленных в проекте задач

а) Разработана математическая модель для моделирования поведения ВСКИ на *локальном* уровне при обычных и чрезвычайных условиях их функционирования (например, при техногенной аварии, природной катастрофе или террористической атаке).

б) Разработана трехуровневая модель испарения масс аварийных выбросов, участвующих в создании поражающих факторов, приведены зависимости частоты выброса и массы опасного вещества (ОВ), произведено моделирование каскадных аварий и графическое построение визуальных моделей зон поражения.

Степень новизны полученных результатов

1. Разработана расширенная модель транспортной сетевой КИ, которая позволяет моделировать взаимозависимые инфраструктуры в виде единой сети, а также их производительность. Модель также включает в себя инструменты для проведения временного анализа ВКИ с несбалансированным спросом и предложением (что абсолютно необходимо для моделирования работы поврежденной из-за аварии инфраструктуры).

Показано, что наиболее важной компонентой является синхронное моделирование функционирования подсистем гибридной ЭЭС в условиях принципиальной непредсказуемости погоды и выбора управляющих воздействий.

2. Разработана практическая комплексная методика оценки риска на ПОО, позволяющая определять массу испарившегося пожаровзрывоопасного облака при разлинии криогенного вещества (СПГ), зоны поражения при пожаре разлиния, взрыве ТВС СПГ, возможность каскадного развития аварии. В структуре общепринятой количественной оценки техногенного риска не учитывается трехуровневая модель испарения масс аварийных выбросов СПГ, участвующих в создании поражающих факторов, каскадное развитие аварий.

Разработка рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов НИР

1. Модель может быть использована для изучения производительности (и через нее, живучести) гораздо более сложных взаимозависимых сетевых инфраструктур, с более высокой скважностью (например, ежечасно, ежеминутно), и рассмотрения таких параметров взаимозависимых КИ как спрос, производство и/или потоки продуктов, как неслучайные функции времени от случайных величин, функций или полей.

2. Методика может быть использована экспертами в области промышленной безопасности при разработке проектной документации, деклараций промышленной безопасности, обосновании безопасности опасных производственных объектов, разработке паспортов безопасности.

Методика позволяет получить безопасные расстояния для предотвращения материального ущерба и развития эффекта «домино», учитывая метеоусловия и характеристики оборудования на конкретном объекте.

Методика может быть использована для оценки риска на ПОО регионов других климатических зон с корректировкой оценки массы СПГ, участвующей в создании поражающих факторов при аварии.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения

1. Внедрение результатов исследования возможно только после завершения всего комплекса работ. Результат исследований позволяет оценивать последствия принимаемых решений в области управления крупными КИ. Эффективность использования будет зависеть от конкретики объектов.

2. Методика может быть внедрена в структуру общепринятой количественной оценки техногенного риска, не учитывающей предлагаемую модель испарения СПГ, каскадное развитие аварий. Методика может быть полезной для экспертов в области промышленной безопасности при разработке проектной документации, деклараций промышленной безопасности, обосновании безопасности опасных производственных объектов.

Оценка научно-технического уровня выполненной НИР в сравнении с лучшими достижениями в данной области

а) Проведенная работа является инновационной, поскольку в ней впервые рассмотрены проблемы надежности и безопасности гибридных объектов энергетики АЗРФ с учетом их взаимозависимости с другими КИ. Показано, что погодные условия являются главным источником неопределенности функционирования арктических ЭЭС.

На реальном примере из двух взаимозависимых систем инфраструктур – электро- и водоснабжения во время зимней метели было показано, как неопределенности, связанные с повреждением/выходом из строя объектов инфраструктуры, могут быть приняты во внимание за счет переменных, которые описывают возникший неудовлетворенный спрос (дефицит) и соответствующие возникшему дефициту стоимости или штрафы.

б) Разработанная методика может быть внедрена в структуру общепринятой количественной оценки техногенного риска; она позволяет учесть каскадное развитие аварии в рамках традиционной структуры анализа и оценки риска;

Разработанная методика оценки риска на ПОО является инновационной, поскольку содержит новый подход к комплексной оценке безопасности ПОО, включающий массу испарившегося пожаровзрывоопасного облака при разливе криогенного вещества (СПГ), зоны поражения при пожаре разлива, взрыве ТВС СПГ, возможность каскадного развития аварии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчете представлены результаты комплексного исследования и первая версия базовой математической конвергентной модели системы взаимозависимых региональных/урбанистических критичных инфраструктур (в том числе вероятностно-энтропийные алгоритмы их мониторинга) как основы для построения модели виртуального умного региона/города. Представлены концепция, методология и основные компоненты технологии трансформации регионов страны в супраживучие умные территории/города.

Предлагаемая стратегия управления регионом (говернанс) представляет собой предсказательный менеджмент, который учитывает все возможные в условиях Иссык-Куля угрозы и риски. Эта стратегия позволяет придать Кыргызстану новое инновационное измерение, позволяющее решить задачу непрерывного роста ВВП республики с одновременным повышением благосостояния ее жителей и роста производства товаров и услуг (в первую очередь, аграрного сектора и туризма).

Целесообразно начать движение в указанном направлении с пилотного проекта создания *супраживучей* Иссык-Кульской области, включая экспертизу и анализ путей повышения экологической, продовольственной, техногенной и урбанистической безопасности Кыргызстана, основанный на анализе надежности, живучести, риска и безопасности по методологии инфранетики. Необходимо также провести синтез разнородных технологий управления: оптимизация долгосрочных и краткосрочных инвестиций (по критериям индекса качества жизни и готовности платить), оптимального майнтенанса, блокчейна, а также критериев максимизации среднего ожидаемой срока жизни и максимальной супраживучести.

Приведены примеры использования векторной энтропийной модели динамики для диагностики и контроля состояния различного типа систем в частности, для моделирования экономических и медицинских систем. Эти примеры свидетельствуют об универсальности энтропийной модели динамики для контроля и диагностики многомерных стохастических различных систем.

Разработан отсутствовавший до сих пор алгоритм оценки относительного изменения СОПЖ – ключевой величины в теории надежности и безопасности инфраструктур (поскольку она является императивным показателем устойчивого развития государств, которая используется при расчете таких показателей как: статистическая стоимость жизни и (социальная) готовность платить (на основе индекса качества жизни); стоимость спасения одной жизни; а также в критерии приемлемости инвестиций в проекты по снижению риска и принципе предельных затрат на сохранение жизни.

Главное преимущество алгоритма – относительное изменение СОПЖ оценивается с помощью закона Гомперца-Мейкхема, который описывает с высокой точностью смертность с помощью математической модели, состоящей из двух компонент: экспоненциально растущей с возрастом и независимой от возраста (случайная смерть). В других работах оценка относительного изменения СОПЖ производится с помощью демографической константы, или с помощью разложения в ряд Тейлора, что позволяет получить только приблизительную оценку СОПЖ.

Работа является частью НИР по оценке средств (доли бюджета), которые могут быть выделены на снижение аварий и катастроф компонент ВКИ и, соответственно, каково будет уменьшение числа смертей природно-техногенного типа на рассматриваемой территории, и как это количественно повлияет на величину СОПЖ региона.

Единственный путь к обеспечению высокой надежности уникальных конструкций, изготавливаемых в единичном экземпляре, состоит в поднятии на следующий уровень технологии их проектирования, изготовления и отладки, используя методологию высокоточного расчета индивидуальной конструкционной надежности (на основе статистики, собранной в новых технологических условиях), для анализа и синтеза его надежности.

Представляется, что первоочередными задачами практической теории индивидуальной конструкционной надежности УК являются:

- построение моделей нагрузок, воздействий и физико-механических свойств материалов и конструкций УК как случайных функций/процессов (СФ) времени или СВ,
- построение корректных и адекватных ФПС и ДО для типовых отказов УК и его критичных компонент,
- оценка начальной надежности УК $R(0)$ и ее эволюции $R(t)$ на всех последующих циклах существования аппарата,
- организационные мероприятия для реализации данного проекта,
- выявление «врожденного уровня надежности», стихийно заложенного в существующие нормы расчета и проектирования УК при их разработке (для *независимого подтверждения приемлемости* конструкторско-технологического подхода к проектированию высоконадежных УК) [17, 18, 3],
- разработка практической орбитальной диагностики и мониторинга,
- оценка живучести УК при их отладке и эксплуатации,
- применение описанной выше методологии индивидуальной конструкционной надежности для обеспечения безынцидентного развертывания УК и численного подтверждения необходимого высокого уровня надежности при его проектировании.

Разработаны методические основы расчета и моделирования взаимозависимых энергетических критичных инфраструктур АЗРФ:

- усовершенствована методология оценки режимной надежности локальных и гибридных ЭЭС АЗРФ в части описания неопределенностей, требующих своего учета;

- составлен перечень случайных параметров окружающей среды (глобальное потепление, климат, свойства грунтов), структурных параметров характерных объектов электроэнергетики АЗРФ (состав и способ взаимодействия компонент), имеющих эпистемные и алеаторные неопределенности;

- предложен способ количественной оценки показателей надежности отдельных узлов подсистем электроснабжения АЗРФ в условиях полного отсутствия конкретных данных об их фактическом поведении в арктическом климате;

- описана методика имитационного моделирования арктической локальной системы ЭЭС в рыночных условиях;

- показано, что гибридная ЭЭС в арктическом исполнении с позиций структурной надежности представляет собой автономную сложно-скомпонованную систему отдельных подсистем, каждая из которых обеспечивает выработку электричества от какого-то одного источника возобновляемой / невозобновляемой энергии. В совокупности они представляют собой систему взаимозависимых критичных инфраструктур (ВКИ);

- основной научной проблемой моделирования взаимозависимых энергетических критичных инфраструктур является синхронное описание их поведения в реальных условиях эксплуатации, когда генерация энергии является прямой функцией погоды (солнце, ветер) в данном районе. Наличие такого описания позволит создать соответствующие расчетные модели анализа их режимной надежности с учетом специфики функционирования основных устройств автоматики и релейной защиты, профилактического и ремонтного обслуживания (мейнтенанса);

- при решении сформулированной выше задачи рекомендуется использовать разработанные процедуры вероятностного эквивалентирования, которые описывают исключения и восстановления узлов в расчетной схеме с отказами типа «обрыв» и «короткое замыкание» в расчетных схемах произвольной сложности. Также целесообразно использовать трехэтапную процедуру анализа статической режимной надежности ЭЭС;

- применение разработанного метода оценки структурной надежности периферийных ЭЭС на основе построения деревьев отказов в сочетании с теорией марковских процессов и энтропийного подхода позволяет оценивать показатели надежности элементов ЭЭС, в том числе, вероятность отказа, коэффициент готовности,

коэффициент вынужденного простоя, а также оценить степень и скорость деградации физических компонент системы.

- выявлены существующие пробелы в фундаментальных и прикладных знаниях, которые не позволяют решить многие актуальные задачи надежности и живучести локальных ЭЭС и требуют своего скорейшего разрешения.

Дана экспериментально-теоретическая оценка возможности использования биоразлагаемых смазочных материалов в узлах трения машин, работающих в условиях низких температур, на примере расчета гидромеханических характеристик шатунного подшипника ДВС. В качестве критерия оценки надежности трибосопряжения использован ряд параметров, в том числе интенсивность изнашивания, ресурс, несущая способность и набор гидромеханических характеристик.

Разработанные методы ускорения расчетов повторного пластического деформирования на переменных режимах конструкций реакторов с жидкометаллическим теплоносителем обеспечивают заметный выигрыш при расчете процесса приработки конструкции. Это является одним из ключевых факторов, определяющих прочность и долговечность реакторов данного типа, и естественно, упрощает оценку накопления повреждений в стабильном цикле для этих конструкций с достаточно большой долговечностью (естественно, в малоцикловой области). Доказательство сохранения типа и механизма деформирования при увеличении нагрузки – или демонстрация их изменения – являются критически важными для оценки прочности и долговечности, а также для планирования (при необходимости) ускоренных испытаний. Предположение о сохранении типа и механизма деформирования при монотонном изменении единственного параметра нагружения, несмотря на внешнее правдоподобие, является верным не всегда и требует тщательного анализа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

К разделу 1.1:

1. Акаев А.А., Акаева Б.А. Кыргызстан в эпоху цифровой экономики на новом шелковом пути. – М.: Леланд, 2019. – 240 с.
2. Тимашев С.А. Инфраструктуры. Часть 1. Надежность и долговечность. – Екатеринбург.: Изд-во УрО РАН, 2016. – 532 с.
3. Timashev S. A. Resilience and Strategic Preparedness of Critical Infrastructures // Proc. of the First Int. Conf. on Vulnerability and Risk Analysis and Management ICVRAM and the Fifth Inter. Symp. on Uncertainty Modeling and Analysis ISUMA, 2011. – P. 764–771.
4. Timashev S. A. Infrastructure Resilience: Definition, Calculation, Application. WEEF, IGIP/ICL Conf. (Pisa Italy), 2016.
5. Timashev S. A. Resilient Urban Infrastructures – Basics of Smart Sustainable Cities. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2017. 262 1 012197.
6. Timashev S. A. and Bushinskaya A.V. Structural resilience. Proc. Safety and monitoring of technogenic and natural systems: VI All-Russian Conf. (Krasnoyarsk), 2018. – P. 36–43.
7. Тимашев С. А., Бушинская А. В., Полуян Л. В. Концепция преобразования города-миллионника в живучий и умный муниципалитет // Сб. матер. и докл. VI Всерос. конф. Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем (Красноярск), 2018. – С. 451–455.
8. Timashev S. A., Alekhin V. N., Poluyan L.V., Fontanals I. and Gheorghe A. Transforming Yekaterinburg into a Safe, Resilient-Smart and Sustainable City // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. 177 1 012001.
9. Проект Умный Регион, Свердловская Область РФ, 2018.
10. Timashev S. A. Black Swan-Type catastrophe and Antifragility Concepts in Critical Infrastructure // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019.
11. Taleb N.N. Anti-fragile. – London: Penguin, 2012.
12. Джибыкеев С. Идейные активы эпоса «Манас» для современного Кыргызстана. Национальный институт стратегических исследований Кыргызской республики. www.rusi.kg/112-stati/135-idejnye-aktivy-eposa-manas-dlya-sovremennogo-kyrgyzstana.html. 2018-09-18.

13. Timashev S. A. and Bushinskaya A. V. Analysis of Interdependence of Arctic Critical Infrastructures as Transportation Networks // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. 481(1) 012008.
14. Тимашев С. А. Инфранетика – новая конвергентная наука 21-го века // Сб. тез. II Междун. конф. SAFETY2016 Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур. – Екатер., 2016. – С. 234–237.
15. Timashev S. A. Infranetics: The New Convergent Science for Risk Based Management of Systems of Interdependent Critical Infrastructures // Proc. of 27th Annual Conf. of the Society for Risk Analysis Europe: Risk & Uncertainty – From Critical Thinking to Practical Impact. – Östersund Sweden, 2018.
16. Timashev S. A. Infranetics: The New MAICS-convergent Technology Science. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. 481 1 012023.
17. Gheorghe A. and Masera M. Infranomics // Int. J. of Critical Infrastructures, 2010. 6(4):421–427.
18. Timashev S. A., Tyrsin A. N., Kozlova O. A., Makarova M. N., Voronina L. N. Methodical Approaches to Assessing the Influence of Budget Expenditures on Average Life Expectancy Scientific Review, 2014. 7–1.
19. Bushinskaya A. V. and Timashev S. A. The Toll of Incidents, Accidents and Disasters on the Average Life Expectancy in Good Health // Proc. of the 29th European Safety and Reliability Conf, 2019. DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3_0614-cd.
20. Burukhina O., Bushinskaya A., Maltceva I., Timashev S. Mechanical system reliability analysis using reliability matrix method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. 365 042067.
21. Timashev S. A. Unified quantitative criteria for managing regional risk Proc. of the 11th Inter. Conf. on Structural Safety & Reliability ICOSSAR. – NY: Columbia University, 2013.
22. Guryev E. S., Poluyan L. V. and Timashev S. A. Construction of dynamic risk maps for large metropolitan areas // J. of Risk Analysis and Crisis Response. – Paris, France: Atlantis Press, 2014. – 4(2). – P. 72–76.
23. Timashev S. A. Average life expectancy as a criterion for regional risk management. J. of Risk Analysis and Crisis Response. – Paris, France: Atlantis Press, 2014. – 4(1). – P. 10–12.
24. Fontanals, L., Tricàs, J., Canalias, F., Fontanals, I., 2014. Resiliencia territorial, vector de gestión de servicios. Estudio de Caso de la Garrotxa. Estudios Empresariales, 144, 2014/1.

25. Fontanals, L; Tricàs, J.; Sempere, J.; Fontanals, I. Mejorando la Resiliencia de las ciudades: Conocimiento industrial aplicado a la Gestión de la Ciudad // CONAMA 2012 (Congreso Nacional del Medio Ambiente), 26-30 November 2012.

26. Тимашев С.А., Тырсин А.Н. Вероятностное агрометеорологическое прогнозирование урожайности сельхозкультур // Безопасность критических инфраструктур и территорий: Матер. VI Всеросс. конф. и XVI школы молодых ученых. – Екатер.: УрО РАН, 2014. – С. 226–238.

27. Тимашев С.А., Бушинская А.В., Полуян Л.В. Предсказательный мейнтенанс сельскохозяйственных машин, комплексов и технологических линий // Безопасность критических инфраструктур и территорий: Матер. VI Всеросс. конф. и XVI школы молодых ученых. – Екатер.: УрО РАН, 2014. – С. 58–59.

К разделу 1.2:

1. Гражданская защита: Энциклопедия в 4-х т. Т. II (К–О). М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015.

2. Корнеева, Т.В. Толковый словарь по метрологии, измерительной технике и управлению качеством. Основные термины: около 7000 терминов / Т.В. Корнеева. М.: Русский язык, 1990. 464 с.

3. Тырсин, А.Н. Энтропийное моделирование многомерных стохастических систем / А.Н. Тырсин. Воронеж: Научная книга. 2016. 156 с.

4. Shannon, C.E. A Mathematical Theory of Communication / C.E. Shannon // The Bell System Technical Journal. 1948. V. 27. № 3. P. 379-423, № 4. P. 623-656.

5. Гельфанд, И.М. Количество информации и энтропия для непрерывных распределений / И.М. Гельфанд, А.Н. Колмогоров, А.М. Яглом // В книге: Труды III Всесоюзного математического съезда. Т. 3. М.: АН СССР, 1958. С. 300-320.

6. Шаповалов, В.И. Основы теории упорядочения и самоорганизации / В.И. Шаповалов В.И. М.: Испо-Сервис, 2005. 296 с.

7. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике: Пер. с англ. / К. Шеннон. М.: Иностранная литература, 1963. 829 с.

8. Стратонович, Р.Л. Теория информации / Р.Л. Стратонович. М.: Советское радио, 1975. 424 с.

9. Cover, T.M. Elements of information theory / T.M. Cover, J.A. Thomas. – Wiley & Sons, Inc., 1991.

10. Левич, А.П. Энтропия как мера структурированности сложных систем / А.П.

Левич // Тр. семинара «Время, хаос и математические проблемы». М.: Институт математических исследований сложных систем МГУ им. М.В. Ломоносова. 2000. Вып. 2. С. 163-176.

11. Климонтович, Ю.Л. Введение в физику открытых систем / Ю.Л. Климонтович. М.: Янус-К, 2002. 284 с.

12. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур: Пер с англ. / И. Пригожин, Д. Кондепуди. М.: Мир, 2002. 461 с.

13. Скоробогатов, С.М. Катастрофы и живучесть железобетонных сооружений (классификация и элементы теории) / С.М. Скоробогатов. Екатеринбург: УрГУПС, 2009. 512 с.

14. Fang, S.C. Entropy Optimization and Mathematical Programming / S.C. Fang, J.R. Rajasekera, H.S.J. Tsao. – Kluwer Academic Publishers, 1997.

15. Тырсин, А.Н. Энтропийно-вероятностное моделирование гауссовских стохастических систем / А.Н. Тырсин, И.С. Соколова // Математическое моделирование. 2012. Т. 24, № 1. С. 88-103.

16. Тырсин, А.Н. Энтропийное моделирование динамики открытых стохастических систем / А. Тырсин // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: Материалы XII Междунар. научно-практ. конф., г. Новочеркасск, 12 апреля 2012 г. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2012. С. 35-39.

17. Tyrsin, A.N. Probabilistic-Entropic Concept of Sustainable Development of the Example of Territories / A.N. Tyrsin, A.A. Surina, A.S. Antonov // In book: Sustainability Assessment. Edited by Dr. María José Bastante-Ceca. Publisher: IntechOpen, 2019. 17 p. DOI: 10.5772/intechopen.89287; <https://www.intechopen.com/online-first/probabilistic-entropic-concept-of-sustainable-development-of-the-example-of-territories>

18. Tyrsin, A.N. Entropy modeling of sustainable development of megacities / A.N. Tyrsin, G.G. Gevorgyan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. V.72. 012010. 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/72/1/012010.

19. Tyrsin, A.N. Probabilistic-Entropic Conception of Sustainable Development of Regional Systems / A.N. Tyrsin, A.S. Antonov // Twelfth International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD), 2019. Moscow, Russia, 2019, pp. 1-3. DOI: 10.1109/MLSD.2019.8911021.

20. Tyrsin A.N., Gevorgyan G.G. Population Health Assessment Based on Entropy Modeling of Multidimensional Stochastic Systems // In: Strijov V., Ignatov D., Vorontsov K. (eds) Intelligent Data Processing. IDP 2016. Communications in Computer and Information

Science. Springer, Cham, 2019. Vol. 794. P. 92–105. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-35400-8_7.

К разделу 1.3:

1. Antonella Petrillo, Domenico Falcone, Fabio De Felice, Federico Zomparelli. Development of a risk analysis model to evaluate human error in industrial plants and in critical infrastructures, 2017. 7 p.

2. F. Fruggiero, M. Ferab, A. Lambiase, P. Maresca, J. Cajad. The role of human fatigue in the uncertainty of measurement, *Procedia Manufacturing* 13 (2017), 2017. P. 1320–1327.

3. P.J. Majewicz, Estimating the Probability of Human Error by Incorporating Component Failure Data from User-Induced Defects in the Development of Complex Electrical Systems, 2017. <https://doi.org/10.1111/risa.12798>.

4. Fabio De Felice, Antonella Petrillo, and Federico Zomparelli Fabio De Felice, Antonella Petrillo Editors. Human Factors and Reliability Engineering for Safety and Security in Critical Infrastructures Decision Making, Theory, and Practice, 2018. 258 p.

5. Yaniel Torres Medina, Sylvie Nadeau, Kurt Landau. Application of human errors analysis in manufacturing: a proposed intervention framework and techniques selection, 2019. 6 p.

6. Human Factors in Human Error Prevention and Mistake Proofing Work Tasks, 2019. 3 p.

7. Laura García López. Dynamics of Performance and Cognitive Human Factors in a Manufacturing System, 2016. 110 p.

8. Ronald L. Boring. Advances in Human Error, Reliability, Resilience, and Performance // Proc. of the AHFE 2019 Int. Conf. on Human Error, Reliability, Resilience, and Performance, July 24-28, 2019, Washington D.C., USA, 2020.

9. Stephen C. Theophilus, Ikpang E. Ekpenyong, Augustine O.Ifelebuegu, Andrew O.Arewa, George Agyekum-Mensah and Tochukwu O. Ajare. A Technique for the Retrospective and Predictive Analysis of Cognitive Errors for the Oil and Gas Industry (TRACer-OGI) // *Safety*, 2017. 3. 23. 22 p.

10. Steven T. Shorrock, Claire A. Williams. Human factors and ergonomics methods in practice: three fundamental constraints // *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. Vol. 17. Is. 5-6: Methodological Issues in Ergonomics Science II, 2016. P. 468-482.

11. Pedro Miguel Ferreira Martins Arezes, Paulo Victor Rodrigues de Carvalho. Ergonomics and Human Factors in Safety Management, 2016. 403 p.
12. Stig O Johnsen, Stine Skaufel Kilskar, Knut Robert Fossum. Missing focus on Human Factors – organizational and cognitive ergonomics – in the safety management for the petroleum industry // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers Part O. J. of Risk and Reliability, 2017. 231(4). P. 400–410.
13. Xing Pan, Zekun Wu. Performance shaping factors in the human error probability modification of human reliability analysis // Int. J. of Occupational Safety and Ergonomics. Published online, 2018.
14. Keith Brumbaugh, Dave Grattan. Can we achieve Safety Integrity Level 3 (SIL 3) without analyzing Human Factors, 2019.
15. Ronald Laurids Boring, Andreas Bye. Bridging Human Factors and Human Reliability Analysis, Human Factors and Ergonomics Society // Annual Meeting Proc., 2018. 52(11). P. 733–737.
16. Stein Haugen, Anne Barros, Coen van Gulijk, Trond Kongsvik, Jan Erik Vinnem. Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World // Proc.s of ESREL 2018, June 17-21, Trondheim, Norway, 2018. Part 4. 212 p.
17. Chiara Franciosi, Valentina Di Pasquale, Raffaele Iannone, Salvatore Miranda. A taxonomy of performance shaping factors for human reliability analysis in industrial maintenance // J. of Industrial Engineering and Management, 2019. 12(1). P. 115–132.
18. Evica Stojiljkovic, Bojan Bijelic, Marko Cvetkovic. Application of Heart Technique for Human Reliability Assessment // FACTA UNIVERSITATIS Series: Working and Living Environmental Protection, 2017. Vol. 14. No 3. P. 187–196.
19. Gh. A. Shirali, T. Hosseinzadeh, K. Ahamadi angali, and Sh. Rostam Niakan Kalhori. Modifying a method for human reliability assessment based on CREAM-BN: A case study in control room of a petrochemical plant, 2019. 6. P. 300–315.
20. P. A. Baziuk, S. S. Rivera, and J. Núñez Mc Leod. Fuzzy Human Reliability Analysis: Applications and Contributions Review, Advances in Fuzzy Systems, 2016. Article ID 4612086, 9. P. 28.
21. K. Laumann, H. Blackman, M. Rasmussen. Challenges with data for human reliability analysis. Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World – Haugen et al. Taylor & Francis Group, London, 2018. P. 315–321.
22. Anthony J. Spurgin. Human Reliability Assessment Theory and Practice, 2017. 304 p.
23. Zekun Wu, Xing Pan, Xianheng Zhao, Yuhang Jiang. The task demands-resources

method: A new approach to human reliability analysis from a psychological perspective, *Quality and Reliability Eng*, 2019. Int. 35(4). P. 1200–1218.

24. Gururaj Mulay. Investigating Quantitative Methods for Evaluating & Predicting Human Reliability & Applying NARA to Human-Robot Interactive Systems, 2019. 9 p.

25. Xing Pan, Ye Lin, Congjiao He. A Review of Cognitive Models in Human Reliability Analysis, 2016. *Quality and Reliability Eng*. 2017. DOI:10.1002/qre.2111.

26. Domenico Falcone, Fabio de Felice, Antonella Petrillo, Alessandro Silvestri. An Experimental Study on Developing a Cognitive Model for Human Reliability Analysis, 2017. DOI: 10.5772/intechopen.69230.

27. C. Moraisa, R. Mourab, M. Beerc, E. Patellia. Human reliability analysis – accounting for human actions and external factors through the project life cycle, *Proceedings of ESREL 2018*. Trondheim, Norway. June 17-21 2018. 10 p.

28. Lukman Irshad, Salman Ahmed, H. Onan Demirel, and Irem Y. Tume Coupling Digital Human Modeling with Early Design Stage Human Error Analysis to Assess Ergonomic Vulnerabilities, 2019. 13 p.

29. Mojgan Aalipour, Yonas Zewdu Ayele, Abbas Barabadi. Human reliability assessment (HRA) in maintenance of production process: A case study, 2016. 16 p.

30. Lecio N. de Oliveira, Isaac Jose A. Luquetti dos Santos and Paulo V. R. Carvalho. A Review of the Evolution of Human Reliability Analysis Methods at Nuclear Industry, 2017. 12 p.

31. Ilse Hogenboom. Comparison of Human Reliability Analysis Method. Applied on the Volkerak sluice complex in the Netherlands, *RISK4-8-E17*, 2018. 67 p.

32. Huiyue Diao, Majid Ghorbani. Production risk caused by human factors: a multiple case study of thermal power plants, *Frontiers of Business Research in China*, 2018. Vol. 12. Article number: 15.

33. Abdelsalam Yasseen, Sergey Peresykin. Integrating Human Factors into Standard Risk Assessment - Proposal Approach, 2018. 12 p.

34. Ivan Sikora, PhD., Riccardo Patriarca, Giulio Di Gravio, Francesco Costantino. MARS – A Fresh Look at Risk Assessment Modelling and Effective Safety Data Communication, 2016. 14 p.

35. C.W. Johnson. The Increasing Risks of Risk Assessment: On the Rise of Artificial Intelligence and NonDeterminism in Safety-Critical Systems, 2018. 15 p.

36. RN Moura. Learning from accidents: human errors, preventive design and risk mitigation, 2017. 149 p.

37. C.W. Johnson. The Increasing Risks of Risk Assessment: On the Rise of Artificial

Intelligence and NonDeterminism in Safety-Critical Systems, 2018. 15 p.

38. ГОСТ Р МЭК 62508-2014 Менеджмент риска. Анализ влияния на надежность человеческого фактора (Дата введения 2015-12-01).

39. NUREG/CR-6883 INL/EXT-05-00509. The SPAR-H Human Reliability Analysis Method. Prepared for Division of Risk Analysis and Applications Office of Nuclear Regulatory Research U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington, DC 20555-0001 NRC Job Code W6355, 2005. 230 p.

40. NUREG-1921. EPRI/NRC-RES Fire Human Reliability Analysis Guidelines, 2009. 322 p.

41. МЭК 60300-2: 2004 Менеджмент надежности. Часть 2. Руководящие принципы для управления надежностью.

42. МЭК 60300-3-15: 2009 Менеджмент надежности. Части 3-15: Руководство по применению. Разработка системы надежности.

43. Stephen J. Guastello. Human Factors Engineering and Ergonomics: A Systems Approach, CRC Press, Taylor&Francis Group, 2014. 417 p.

44. B.S. Dhillon. Safety, Reliability, Human Factors, and Human Error in Nuclear Power Plants, CRC Press, 2017. 252 p.

45. Marko Cepin, Radim Bris. Human Factors and Human Reliability. Safety and Reliability. Theory and Applications. 1st Ed., CRC Press, 2017. 540 p.

46. R. Moura, E. Patelli, J. Levis, C. Morais, M. Beer. Human Factors Influencing Decision Making: Tendencies From First-Line Management Decision And Implications To Reduce Major Accidents. Safety and Reliability. Theory and Applications, ESREL-2017-Portoroz...18-22 June 2017.

47. S. Jang, M. Jae. A Development of A Methodology To Calculate Human Error Probability of Severe Accident Mitigating Strategy Using Dynamic HRA Method Safety and Reliability. Theory and Applications, ESREL-2017-Portoroz...18-22 June 2017.

48. Poluyan L. V. Assessment of human factor in critical infrastructures / L. V. Poluyan, M. G. Malukova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 481. Iss. 1. 12001.

49. BAO, Y., GUO, C., ZHANG, J. et al. J. Mod. Power Syst. Clean Energy, 2018. 6. 27 p.

50. Yingkai BAO, Chuangxin GUO, Jinjiang ZHANG, Jiixin WU. Impact analysis of human factors on power system operation reliability // J. Mod. Power Syst. Clean Energy, 2016. DOI 10.1007/s40565-016-0231-6.

51. Dillon B.S. Human Reliability and Error in transportation systems. Springer, New

York, 2007. 190 p.

52. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Thomas L. Saaty
McGraw-Hill Int. Book Company, New York, 1980. 281 p.

К разделу 2:

1. Коссова Т.В., Шелунцова М.А. Социальная ставка дисконтирования в России: методология, оценка, межрегиональные различия // ЭНСП, 2012. № 3 (58) С. 16–27.

2. Yaari M. E. Uncertain Lifetime, Life Insurance and the Theory of the Consumer, *Review of Economical Studies*, 1965. 32, 2. P. 137–150.

3. Usher D. An imputation to the measure of economic growth for changes in life expectancy, published in *National Accounting and Economic Theory: The Collected Papers of Dan Usher Vol. 1*, 105–144. Edward Elgar Publishing Ltd., UK, 1994.

4. Shepard D.S., Zeckhauser R.J. Survival versus consumption // *Manage Sci*, 1984. 30 (4). P. 423–439.

5. Recent developments in reliability-based civil engineering. Edited By: Achintya Haldar. World Scientific Pub Co Inc, 2006. 277 p.

6. Nathwani J.S., Lind N.C., Pandey M.D. Affordable safety by choice: the life quality method // Institute for Risk Research, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 1997.

7. Lind N.C. Target reliabilities from social indicators. *Proc ICOSSAR93 Balkema*, 1994; 93:1897–904.

8. Easterlin RA. The worldwide standard of living since 1800. *J. Econ Persp*, 2000; 14(1):7–26.

9. Pandey M.D., Nathwani J.S. Canada wide standard for particulate matter and ozone: cost–benefit analysis using a life-quality index // *Risk Anal*, 2003, 23 (1). P. 55–68.

10. Jakobovits I. *Jewish Medical Ethics*, New York, 1975.

11. Rackwitz R. The Philosophy Behind the Life Quality Index and Empirical Verification // *Risk Assessment in Engineering*. November, 2008.

12. Maddison A. *Monitoring the world economy 1820–1992* // OECD, Paris, 1995.

13. Rackwitz R. Discounting for optimal and acceptable technical facilities involving risks // *HERON*, 2004. Vol. 49. No. 2. P. 130–170.

14. Rackwitz R. Optimization and risk acceptability based on the life quality index // *Struct Saf*, 2002. 24. P. 297–331.

15. Keyfitz N. *Applied mathematical demography* // Springer, New York, 1985.

16. Gompertz B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on a new mode of determining life contingencies // *Philos. Trans. Roy. Soc. London. A.* 1825. Vol. 115. P. 513–585.
17. Гаврилов Л.А., Гаврилова Н.С. Биология продолжительности жизни. Отв. ред. В. П. Скулачев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1991. 280 с.
18. Makeham W.M. On the law of mortality and the construction of annuity tables // *J. Inst. Actuaries*, 1860. Vol. 8. P. 301—310.
19. Perks W. On the some experiments in the graduation of mortality statistics // *J. Inst. Actuaries*. 1932. Vol.63. P. 12–40.
20. Крутько В.Н., Донцов В.И., Смирнова Т.М. Теория, методы и алгоритмы диагностики старения // *Тр. ИСА РАН*, 2005. Т. 13. С. 105–143.
21. Pearce D.W., Ulph. D. A Social Discount Rate for the United Kingdom / CSERGE Working Paper 95-01. Centre for Social and Economic Research on the Global Environment. Norwich: University of East Anglia, 1995.
22. Evans D., Sezer H. Social Discount Rates for Six Major Countries // *Applied Economics Letters*, 2004. № 11. P. 557–560.
23. Percoco M. A Social Discount Rate for Italy // *Applied Economics Letters*, 2008. № 15. P. 73–77.
24. Andersson, G. *Livförsäkringsmatematik*, Svenska Försäkringsföreningen, Stockholm: Sverige, 2005. ISBN: 91-974960-1-4.
25. Lageras, A.N. Analytical and easily calculated expressions for continuous commutation functions under Gompertz-Makeham mortality. Department of Mathematics, Stockholm University, 2009.

К разделу 3:

1. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. М.: Наука, 1965. 524 с.
3. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. 340 с.
4. Тимашев С.А. Системный подход к оценке надежности механических систем // *Исследования в области инженерных сооружений*. Л., 1979. С. 5–24.

5. Timashev S.A. Reliability of Large Mechanical Systems. SEAG, Pavia, Italy, 1984. 155 p.
6. Тимашев С.А. Инфраструктуры. В 3 т. Т. 1. Надежность и долговечность. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. 530 с.
7. Тимашев С.А., Бушинская А.В., Малюкова М.Г., Полуян Л.В. Целостность и безопасность трубопроводных систем. Екатеринбург: АМБ, 2013. 590 с.
8. Timashev S.A., Bushinskaya A.V. Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. Switzerland: Springer Int. Publ., 2016. 408 p.
9. Надежность механических частей конструкции летательных аппаратов. А.А. Кузнецов, А.А. Золотов, В.А. Комягин и др. М.: Машиностроение, 1979. 144 с.
10. Тимашев С.А. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций. Свердловск: УралпромстройНИИпроект, 1974. 102 с.
11. Тимашев С.А. Основные положения комплексной системы управления качеством изготовления и исходной надежностью стальных строительных конструкций. Свердловск: УралпромстройНИИпроект, Челябинский ЗМК, 1974. 36 с.
12. Тимашев С.А. Оптимизация механических систем по критериям надежности // Автоматизированная оптимизация проектирования конструкций. Хабаровск, 1977. С. 152–159.
13. Пат. 2198387 Российская Федерация. МПК G 01L 3/00, 5/00. Способ выбора привода для поворота конструкции в шарнирном узле / Ю.П. Похабов. №2000129330/28; заявл. 23.11.2000; опубл. 10.02.2003. Бюл. № 4.
14. ATR-2009(9369)-1. Critical Clearances in Space Vehicles / Brian W. Gore. The Aerospace Corporation. 2008. 42 p.
15. Гишваров А.С., Тимашев С.А. Теоретические основы ускоренной оценки и прогнозирования надежности технических систем. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 80 с.
16. Тимашев С.А. Надежность больших механических систем. М.: Наука, 1982.
17. Тимашев С.А., Похабов Ю.П. Проблемы комплексного анализа и оценки индивидуальной конструкционной надёжности космических аппаратов (на примере поворотных конструкций). Екатеринбург, 2018. 38 с.
18. Тимашев С.А., Похабов Ю.П. Новые методы анализа и оценки надежности изделий ракетно-космической техники // Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем: Сб. матер. и докл. VI Всерос. конф. Красноярск, 2018. С. 254–258.

К разделу 4:

1. Руденко Ю.Н., Чельцов М.Б. Надежность и резервирование в энергосистемах. Новосибирск: Наука. – 1974.
2. Александров И.А., Веников В.А. и др. Проблемы надежности электроэнергетических систем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1976. – № 1. – С. 38–45.
3. Арзамасцев Д.А., Липес А.В., Мызин А.Л. Модели оптимизации развития энергосистем. Учебник для вузов / Под ред. Д.А. Арзамасцева. – М.: Высш.шк. – 1987. – 272 с.
4. Китушин В.Г. Проблемы надежности электроэнергетических систем. Дискуссия // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1976. – № 1. – С. 45-47.
5. Веселов С.И., Михайлов В.В., Эдельман В.И. Методика определения величины ущерба потребителя от перерывов электроснабжения // Промышленная энергетика. – 1967. – № 12. – С.29–32.
6. Китушин В.Г. Прогнозирование надежности энергосистем и учет ее при проектировании // Тр. Энергосетьпроекта. – Вып 2. – 1971. – С. 34–47.
7. Михайлов В.В. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоиздат. – 1982.
8. Ерхан Ф.М., Бобер А.Г. Оценка оптимальной надежности электроэнергетических систем // Изв. АН МССР. Серия физ-техн. и матем. наук. – 1983. – № 2. – С. 69–71.
9. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. – М.: Высшая школа. – 1984.
10. Лосев Э.А. Методы обеспечения рационального уровня надежности систем электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. –1980. – № 11. – С. 17–19.
11. Могирев В.В, Руденко Ю.Н. О показателях надежности питания потребителей в системах энергетики // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Иркутск: СЭИ СО АН СССР. –1979. – Вып.11 . – С. 80–84.
12. Руденко Ю.Н. О подходах к нормированию показателей надежности электроснабжения потребителей // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1975. –№ 1. – С. 14–23.
13. Синьчугов Ф.И. О нормировании надежности электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. –1975. – № 5. – С. 29-31.

14. Королев С.Г., Синьчугов Ф.И. Нормирование надежности электрических сетей энергосистем и систем электроснабжения потребителей // Электрические станции. – 1987. – № 5. – С. 44–49.
15. Oboskalov V., Timashev S., Bushinskaya A., Gusev S. Stochastic network reduction technique for calculations of electrical power system structural reliability. // Proc. of the 2nd Int. Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science, and Operations Management (SMRLO). – 2016. – P. 144–149.
16. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. Теоретические основы: учеб. пособ. Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2003.
17. Обоскалов В. П. Структурная надежность электроэнергетических систем: учеб. пособие. Екатеринбург: УрФУ. – 2012.
18. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник. В 4 т. Т.2: Надежность электроэнергетических систем / Под общ. ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат. – 2000.
19. Endrenyi J. Reliability modelling in electric power systems. Chichester etc.: Wiley. – 1979. 338 p. (Эндрени Дж, Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах. – М.: Энергоиздат. – 1983. – 336 с.)
20. Грудинский П. Г. Схемы коммутации электрических станций и подстанций. – М.: Госэнергоиздат. – 1948. – 168 с.
21. Синчугов Ф. И. Надежность электрических сетей энергосистем. – М.: ЭНАС. – 1998.
22. Фокин Ю.А., Туфанов В.А. Оценка надежности систем электроснабжения. –М.: Энергоиздат. –1981.
23. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М.: Сов. радио. –1975.
24. Billinton R., Allan R. N. Reliability Evaluation of Power Systems. London: Pitman Advanced Publishing Program. – 1984. – 432 p.
25. Райншке К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов. – М.: Радио и связь. – 1988.
26. Обоскалов В.П., Валиев Р.Т. Вероятностно-аналитический метод расчета показателей балансовой надежности ОЭС // Изв. РАН. Энергетика. – 2019. – № 1. – С. 37–49.
27. Обоскалов В.П., Менаем А. Абдель, Кирпиков А.В. Оценка вероятностных параметров дефицита мощности в концентрированной ЭЭС // Изв. РАН. Энергетика. – 2019. – № 4. – С. 16–26.

28. Oboskalov V.P., Gubin P.Y., Gusev S.A., Valiev R.T., Mahnitko A., Varfolomejeva R. Adequacy analysis in bulk power systems based on the analytical-probabilistic method // Proc. of the 10th Int. Scientific Symp. on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA. – 2019. – P. 122–127.

29. Oboskalov V., Menaem A. A., Valiev R., Mahnitko A., & Varfolomejeva R. Mathematical methods for probabilistic estimation of power shortage in concentrated electric power systems. // Proc. of the 10th Int. Scientific Symp. on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA. – 2019. – P. 128–132.

К разделу 6:

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessels. Division 2 Alternative Rules. – New York, NY. – ASME, 2015. – 848 p.

2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г 7-002-86. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 526 с.

3. Hübel H., Vollrath B. Simplified determination of accumulated strains to satisfy design code requirements // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. Vol. 171, 2019. – P. 92-103.

4. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Chernyavskii O.F., Evropin S.V. Low-cycle deformation of the structures in a nuclear power plant and methods for calculating them // Atomic Energy, 2009. T. 107. № 3. – С. 173–179.

5. Prasad Reddy GV, Dinesh PM, Sandhya R, Laha K, Jayakumar T. Behavior of 321 stainless steel under engineering stress and strain controlled fatigue // Int. J. Fatigue, 2016; 92:272–80.

6. Ahmed Raasheduddin, Barrett Paul R, Hassan Tasnim. Unified viscoplasticity modeling for isothermal low-cycle fatigue and fatigue-creep stress–strain responses of Haynes 230 // Int. J. Solids Struct, 2016; 88–89:131–45.

7. Facheris G, Janssens KGF. Cyclic mechanical behavior of 316L: uniaxial LCF and strain-controlled ratcheting tests // Nucl Eng Des; 257:100–108.

8. Cherniavsky O., Rebiakov Yu., Cherniavsky A. Properties of steels and chromium-nickel alloys under low-cycle combined deformation // Int. J. Fatigue, 2017. 103. P. 415–418.

9. Simon J.-W., Chen G., Weichert D. Shakedown analysis of nozzles in the knuckle region of torispherical heads under multiple thermo-mechanical loadings // Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 2014. 116(1). P. 47–55.

10. Безносов А.В., Бокова Т.А. Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике. – Нижний Новгород: изд-во нижегородского университета, 2012. – 536 с.
11. Etay J., Fautrelle Y. Interfaces fluides sous l'effet de champs électromagnétiques // Динамика, прочность и износостойкость машин, 1998, №5. С. 13–21.
12. Watanabe D., Chuman Y., Otani T., Shibamoto H., Inoue K., Kasahara N. An experimental validation of the guideline for inelastic design analysis through structural model tests // Nuclear Engineering and Design, 2008. Vol. 238, № 2. P. 389–398.
13. Angiolini M.E., Aiello G., Matheron P., Pilloni L., Giannuzzi G.M. Thermal ratcheting of a P91 steel cylinder under an axial moving temperature distribution // J. of Nuclear Materials, 2016. 472. P. 215–226.
14. Lee, H.-Y. , Kim, J.-B. , and Lee, J.-H. Thermal Ratchetting Deformation of a 316 L Stainless Steel Cylindrical Structure Under an Axial Moving Temperature Distribution // Int. J. Pressure Vessels Piping, 2003. 80(1). – P. 41–48.
15. Hübel H., Vollrath B. Limited Versus Unlimited Strain Accumulation Due to Ratcheting Mechanisms // J. Pressure Vessel Technol, 2019. 141(3), 031206. 10 p. Paper No: PVT-18-1148. DOI: 10.1115/1.4042853.
16. Gokhfeld D., Cherniavsky O. Limit Analysis of Structures at Thermal Cycling. Sijthoff and Noordhoff Intern. Publ. Alphen aan den Rijn — the Netherlands, Rockville, Maryland — USA, 1980. 538 p.
17. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 456 с.
18. Bree J. Elastic-plastic behavior of thin tubes subjected to internal pressure and intermittent high-heat fluxes with application to fast nuclear reactor fuel elements // J. Strain Anal., 2 (3), 1967. P. 226–238.
19. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. – Киев: Наукова думка, 1978. 238 с.
20. Tereshin D.A., Cherniavsky O.F. Theoretical basis and a finite element formula for the direct calculation of steady plastic states (Book Chapter) // Direct Methods for Limit and Shakedown Analysis of Structures: Advanced Computational Algorithms and Material Modelling (ed. D.Weichert) – Elsevier, 2015. – P. 81–104.

К разделу 7:

1. Ahuja R.K., Magnanti T.L., Orlin J.B. Network Flows: Theory, Algorithms and Applications. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
2. Качур С.А. Моделирование аварийных ситуаций ядерных энергетических установок на основе стохастических сетей Петри // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. № 4(40), 2011. – С. 22–29.
3. Val D.V., Holden R., Nodwell S. Probabilistic assessment of failures of interdependent infrastructures due to weather related hazards // 11-th Int. Conf. on Structural Safety & Reliability. New York, USA. June, 2013.
4. Svendsen N., Wolthusen S. Connectivity models of interdependency in mixed-type critical infrastructure networks // Information Security Technical Report. № 12(1), 2007. – P. 44–55.
5. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. Утверждена Президентом Российской Федерации В. В. Путиным 08.02.2013 г. Пр. № 232. [Электронный ресурс]: Сайт Правительства Российской Федерации. Режим доступа: <http://government.ru/media/files/2RpSA3sctElhAGn4RN9dHrtzk0A3wZm8.pdf/> (дата обращения: 09.10.2019).
6. Ежегодный доклад (2014 год) Экспертного Совета по Арктике и Антарктике при Совете Федерации Федерального Собрания Российской Федерации «О состоянии и проблемах законодательного обеспечения реализации Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. О состоянии и проблемах законодательного обеспечения научной деятельности Российской Федерации в Антарктике». – С. 105.
7. Маршалл В. Основные опасности химических производств. – М., 1989. – 672 с.
8. Хэйвенс Д. Оценка потенциальных угроз общественным интересам в связи с планируемым размещением импортного терминала СПГ в порту Лонг-Бич. Калифорния, 2005. – 53 с.
9. Russell A. Ogle, Juan C. Ramirez, and Suzanne A. Smyth Calculating the Explosion Energy of a Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion Using Exergy Analysis // Process Safety Progress. – March 2012. – Vol. 31, № 1. – P. 51–54.

10. Bhattacharya R., Ganesh Kumar V. Consequence analysis for simulation of hazardous chemicals release using ALOHA software // Int. J. of Chem.Tech Research, 2015. Vol. 8, № 4. – P. 2039–2046.
11. Hemmatian B., Planas E., Casal J. On BLEVE definition, the significance of superheat limit temperature (Tsl) and LNG BLEVE's // J. of Loss Prevention in the Process Industries, journal homepage: www.elsevier.com/locate/jlp, 2016. – № 40. – P. 81.
12. Henk W.M. Witlox Overview of consequence modelling in the hazard assessment package PHAST // Corresponding author address: Henk W.M. Witlox, DNV Software, Palace House, 3 Cathedral Street, London SE1 9DE, UK.
13. Cavanagh Nic Recent advances in software for modelling the risks associated with gas explosions in congested spaces using the Multi Energy Method // DNV Software, Palace House, 3 Cathedral Street, London, UK, nic.cavanagh@dnv.com.
14. Bain Brian, Worthington David, Spitzenberger Cynthia, Falck Andreas Domino effect modelling considerations for quantitative risk assessment of offshore installations // DNV GL, WHITEPAPER, Safeti Offshore, URL: www.dnvgl.com/software.
15. Hemmatian Behrouz Contribution to the study of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions and their mechanical effects // A Doctoral Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the award of Doctor of Philosophy in Chemical Engineering. Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona, Catalonia, Spain. – July, 2016. – P. 172.
16. Abbasi Tasneem, Abbasi S.A. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management // J. of Hazardous Materials. – 2007. – № 241. – P. 489–519.
17. Henk W.M. Witlox and Adeyemi Oke. Verification and validation of consequence and risk models for accidental releases of hazardous chemicals to the atmosphere. – P. 1 – 11.
18. Mengmeng Xie, Roekaerts Dirk, Tummers Mark Thermodynamic and gas dynamic aspects of a BLEVE // Department of Multi-Scale Physics Faculty of Applied Sciences Delft University of Technology, 2007. – P. 70.
19. Сафонов В.С., Мельников А.В., Ганага С.В. Анализ возможных последствий аварийных разливов СПГ на воду из грузовых емкостей танкеров вблизи объектов береговой инфраструктуры // Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа, 2018. – № 4 (36). – С. 115–122.
20. Сафонов В.С. О необходимости проведения анализа рисков при обосновании типа и конструктивных характеристик изотермических хранилищ для комплексов СПГ

различного назначения // Науч.-техн. сб. Вести газовой науки, 2017. – № 2 (29). – С. 154 – 170.

21. Сафонов В.С. Анализ особенностей растекания и испарения СПГ на водной поверхности при аварийных нарушениях герметичности грузовых емкостей танкеров // Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности, 2018. – № 2 (34). – С. 177–190.

22. Люгай Д.В., Сафонов В.С. Обоснование возможных сценариев и оценка последствий утечек сжиженного природного газа при аварийных нарушениях герметичности грузовых емкостей танкеров // Науч.-техн. сб. Вести газовой науки, 2018. – № 2 (34). – С. 166–176.

23. Болодьян И.А. Пожаровзрывобезопасность объектов хранения сжиженного природного газа. Процессы испарения и формирования пожаровзрывоопасных облаков при проливе жидкого метана. Методики оценки параметров. Пожарная безопасность, 2000. – № 2. – С. 86–96.

24. Кочетов Н.М. Моделирование процесса парообразования сжиженных газов при их аварийном разливе. // Проблемы анализа риска, 2009. – № 3. – С. 64–71.

25. Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. Сравнительный анализ подходов для расчета интенсивности испарения с поверхности аварийного пролива // Вестник технологического университета, 2016. – Т. 19. – № 8. – С. 116–118.

26. Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И.. Моделирование парообразования с поверхности аварийного пролива сжиженного газа // Вестник Казанского технологического университета, 2012. – Т. 15. – № 4. – С. 110–112.

27. Старовойтова Е.В. Прогнозирование последствий аварийных залповых выбросов сжиженных газов. г. Казань. Диссертация к.т.н., 2012. – 195 с.

28. Долгова М.А., Галеев А.Д., Поникаров С.И. Влияние температуры окружающей среды на процесс испарения нагретой жидкости с поверхности аварийного пролива // Пожаровзрывоопасность, 2010. – Т. 19. – № 6. – С. 23–26.

29. Оксанич И.Н., Беспалов В.П., Ковалец И.В. Сравнение методик расчета параметров испарения опасных жидкостей с поверхности бассейна разлива на твердую поверхность // Математичні машини і системи, 2017. – № 2. – С. 49–59.

30. Лесконог А.А., Чуркин Г.Ю., Бекасов Ю.В. Основные проблемы обеспечения промышленной безопасности криогенных трубопроводов сжиженного природного газа // Безопасность труда в промышленности, 2017. – № 12. – С. 41–46.

31. Аметистова Л.Е., Книжников. Экологические аспекты СПГ-проектов в арктических условиях. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), –М., 2016. – 48 с.

32. Лесконог А.А., Чуркин Г.Ю. Нормативное обеспечение и проблемные вопросы промышленной безопасности криогенных трубопроводов отгрузки сжиженного природного газа // Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности, 2018. – № 2 (34). – С. 135 – 140.

33. ГОСТ Р 57431 — 2017 (ИСО 16903:2015). Газ природный сжиженный. – М.: Стандартиформ, 2017. – 15 с.

34. Руководство по безопасности для складов сжиженных углеводородных газов и легковоспламеняющихся жидкостей под давлением. Серия 09. Вып. 34. – М.: ЗАО НТЦ исследований проблем промышленной безопасности, 2012. – 56 с.

35. Сюткина Е.В., Гурьев Е.С., Полуян Л.В. Математическое моделирование поражающих воздействий при аварийных выбросах химически опасных веществ с использованием программного комплекса ALOHA // Сб. матер. межд. конф. «Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур», 2017. – С. 201–211.

36. Poluyan L.V., Syutkina E.V., Guryev E.S. Software Systems for Prediction and Immediate Assessment of Emergency Situations on Municipalities Territories // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2017. – Vol. 262, – 6 p. doi: 10.1088/1757-899X/262/1/012199.

37. Poluyan L.V. Assessing risk and resilience of critical infrastructures in the fuel and energy economy involving failure cascading effects // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 481. №1012010. doi:10.1088/1757-899X/481/1/012010.

38. Сравнение результатов расчетов последствий аварийных выбросов опасных веществ по программным комплексам ТОКСИ+ и PHAST / М.В. Лисанов, К.В. Ефремов, С.И. Сумской и др. // Безопасность труда в промышленности, 2011. – № 2. – С. 56–60.

39. Программный комплекс ТОХИ+Risk 4.3.0 для оценки риска и расчета последствий аварий на производственных объектах. Руководство пользователя. ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 301 с.

40. Лисанов М.В. Анализ возможности каскадного развития аварии на взрывопожароопасных объекта // Безопасность труда в промышленности, 2007. – № 5. – С. 42-47.

41. ALOHA Software. [Электронный ресурс] URL: <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software> (дата обращения – 12.07.2019).

42. ALOHA [Электронный ресурс] URL: <http://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/aloha.pdf> (дата обращения – 12.07.2018).

43. Reynolds, M.R., 1992. ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.0 Theoretical Description. In: NOAA Technical Memorandum NOS ORCA-65. Seattle, Washington (U.S.).

44. Bahman Abdolhamidzadeh, Tasneem Abbasi, D. Rashtchian, S.A. Abbasi. Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns // J. of Loss Prevention in the Process Industries, 2011. – № 24. – P. 575–593.

45. Clini F., R. Darbra M., Casal J. Historical Analysis of Accidents Involving Domino Effect // Chemical Engineering Transactions, 2010. – №19. – P. 335–340.

46. Darbra R.M., Palacios A., Casal J. Domino effect in chemical accidents: main features and accident sequences // J. of Hazardous Materials, 2010. – № 183. – P. 565–573.

47. Карионова Л.А., Полуян Л.В., Гурьев Е.С. Экспресс-методика оценки зон поражения при каскадных авариях // Сб. матер. II Межд. конф. «Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур», Екатеринбург, УрФУ, 2016. – С. 121–125.

48. Отчет о научно-исследовательской работе. Часть 1 – Методика оценки парциальной и общей живучести критичных инфраструктур по теме: Разработка междисциплинарных основ безопасности больших критичных систем и инфраструктур в условиях штатных и чрезвычайных ситуаций (№ 0407-2018-0002) Рег. № НИОКТР АААА-А18-118021290023-3. – Екатеринбург, 2018.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. L V Poluyan and M G Malukova. Assessment of human factor in critical infrastructures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 481. №1 012001. doi: 10.1088/1757-899X/481/1/012001.
2. S A Timashev and A V Bushinskaya. Analysis of Interdependence of Arctic Critical Infrastructures as Transportation Networks // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Vol. 481. №1, 2019. 1 012008. doi: 10.1088/1757-899X/481/1/012008.
3. S A Timashev. Cyber Reliability, Resilience, and Safety of Physical Infrastructures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 481. №1 012009. doi: 10.1088/1757-899X/481/1/012009.
4. LV Poluyan. Assessing risk and resilience of critical infrastructures in the fuel and energy economy involving failure cascading effects // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 481. №1 012010. doi:10.1088/1757-899X/481/1/012010.
5. S.A. Timashev. Infranetics: The New MAICS-convergent Technology Science // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 481. №1 012023. 15 p. doi: 10.1088/1757-899X/481/1/012023.
6. Tyrsin A.N., Gevorgyan G.G. Population Health Assessment Based on Entropy Modeling of Multidimensional Stochastic Systems // In: Strijov V., Ignatov D., Vorontsov K. (eds) Intelligent Data Processing. IDP 2016. Communications in Computer and Information Science. Vol. 794. Springer, Cham, 2019. P. 92–105. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-35400-8_7.
7. Барбин Н.М., Кобелева А.М., Терентьева Д.И., Алексеев С.Г. Термодинамическое моделирование термических процессов с участием радионуклидов хлора, кальция, бериллия, никеля, цезия при нагреве радиоактивного графита в парах воды // Радиохимия, 2019. Т. 61. № 2. С. 142–147. DOI: 10.1134/S0033831119020096.
8. Alexeev Sergey G., Alexeev Kirill S., Barbin Nicolay M., Alexeeva Dar'ya L. Prediction of physical-chemical and fire hazard characteristics by carbon chain rules. 2. Carboxylic acids // Journal of Siberian Federal University-Chemistry, 2019. Т. 12, № 1. С. 18–30. DOI: 10.17516/1998-2836-0105.
9. Обоскалов В.П., Валиев Р.Т. Вероятностно-аналитический метод расчета показателей балансовой надежности ОЭС // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2019. № 1. С. 37-49. DOI: 10.1134/S0002331019010096.

10. Обоскалов В.П., Менаем А. Абдель, Кирпиков А.В. Оценка вероятностных параметров дефицита мощности в концентрированной ЭЭС // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2019. № 4. С. 16–26. DOI: 10.1134/S0002331019040095.

11. Tyrsin A.N., Antonov A.S. Probabilistic-Entropic Conception of Sustainable Development of Regional Systems // Twelfth Int. Conf. "Management of large-scale system development" (MLSD), 2019. Moscow, Russia, 2019. P. 1–3. doi: 10.1109/MLSD.2019.8911021.