

На правах рукописи



Бочков Александр Владимирович

МЕТОДОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ
ГАЗОСНАБЖЕНИЯ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

05.26.02 — Безопасность в чрезвычайных ситуациях
в нефтяной и газовой промышленности

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва — 2019

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью «Газпром газнадзор» (ООО «Газпром газнадзор»)

Научный консультант: Лесных Валерий Витальевич, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ.

Официальные оппоненты: Акимов Валерий Александрович, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (ФЦ), заместитель председателя Экспертного совета МЧС России.

Шубинский Игорь Борисович, д.т.н., профессор, заместитель руководителя научно-технического комплекса, Научно - исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»).

Сендеров Сергей Михайлович, д.т.н., заместитель директора по научной работе, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина.

Защита состоится «16» октября 2019 г. в 13:30 часов на заседании диссертационного совета Д 511.001.03, созданного на базе ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 142717, Московская обл., Ленинский район, сельское поселение Развилковское, посёлок Развилка, Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ООО «Газпром ВНИИГАЗ» <http://vniigaz.gazprom.ru/activities/other/education/discouncil/511.001.03>

Автореферат разослан «_____» _____ 201_ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



И.Н. Курганова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Научная проблема обеспечения безопасности объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в условиях изменения состава и интенсивности угроз устойчивому развитию отрасли, имеет важное хозяйственное значение и не теряет своей актуальности на протяжении длительного времени. Структурно сложные технические системы (ССТС), подобные Единой системе газоснабжения (ЕСГ), относятся к классу открытых систем, крайне сложных для оценки и управления. Их неизолированность подразумевает не только динамическое взаимодействие с внешним окружением, но и воздействие этого окружения на сами системы. В роли таких воздействий могут выступать как природные катаклизмы и крупномасштабные аварии, так и противоправные акции или информационные диверсии. Предвидеть и уметь оценить последствия таких воздействий, характеризующихся большой неопределенностью времени, места и способа проведения, а также выбором конкретного объекта воздействия – задача крайне актуальная в современном глобализованном мире. Необходимость развития межотраслевого подхода к проблеме обеспечения безопасности и устойчивого функционирования объектов критически важной инфраструктуры (ОКВИ) ТЭК требует разработки единого методического подхода к исследованию надёжности, безопасности, устойчивости и живучести. Мировой опыт решения подобной проблемы привел к созданию систем обеспечения комплексной безопасности, ответственных как за обеспечение производственной безопасности, так и за обеспечение защищённости ОКВИ от актов незаконного вмешательства, что требует развития теоретических основ и построения адекватного инструментария информационно-аналитической работы в области поддержки принятия решений по обеспечению комплексной безопасности ССТС, ранжированию целей, проблем и угроз, перераспределению ресурсов. Все эти обстоятельства определяют высокую актуальность, объект и предмет настоящего диссертационного исследования.

Степень научной разработанности проблемы. Проблемы обеспечения безопасности и исследования устойчивости ССТС нашли отражение в работах как отечественных, так и зарубежных исследователей: Э. Квейд, К. Боулдинг, Е. А. Мамчур, Н. Ф. Овчинников, А. И. Уемов, Л. А. Растринин, Ю. Н. Руденко, Н. П. Бусленко, И. А. Ушаков и др.

Надёжность технических систем и методы оценки риска для них разрабатывали Х. Кумамото и Э. Хенли. Вопросам надёжности, безопасности, живучести и устойчивости функционирования систем энергетики посвящены работы Ю. Н. Руденко, Н. И. Воропая, С. М. Сендерова, М. Г. Сухарева, Н. Н. Радаева, И. А. Ушакова, В. В. Харионовского. Логико-вероятностный подход к анализу надёжности и безопасности структурно-сложных систем развивали И. А. Рябинин, Е. Д. Соложенцев, А. С. Можаяев. В. М. Глушковым введён в рассмотрение новый класс динамических моделей – развивающиеся системы. А. В. Костровым, Н. А. Махутовым, О. Г. Гохманом, С. В. Зинкевичем, Н. Н. Жигиревым, В. М. Бруком, В. И. Николаевым и другими разрабатывались

методы ранжирования объектов, основанных на математическом моделировании, экспертных оценках, теории принятия решений и интервальном оценивании. Решения композиционных задач, типа задачи формирования портфеля заказов на выполнение работ при ограничениях на ресурсы, разрабатывались Н. Н. Жигиревым, И. Б. Руссманом.

Развитию методов экспертных оценок и экспертных технологий для построения зависимостей между полезностью и первичными ресурсными факторами посвящены работы Б. Г. Литвака, О. Г. Гохмана и др. Специфический аппарат статистической обработки первичных данных разрабатывали Д. Кокс и Д. Хинкли, а методологию использования инструментов нечёткой логики А. Н. Мелихов, Л. С. Бернштейн и В. И. Ширяев. Применение системного подхода к изучению и проектированию сложных систем развито В. С. Михалевичем и В. Л. Волковичем.

Описание ЕСГ как ССТС, входящей в качестве подсистемы в ТЭК, а также анализ её основных свойств были впервые выполнены В. А. Смирновым и развиты Л. А. Мелентьевым. Эвристические алгоритмы, которые при незначительном ухудшении разбиения значительно сокращают объем вычислений для получения оптимальных разбиений, предлагались Р. П. Шейманом, О. В. Завьяловым, И. Б. Руссманом. Задачей многокритериального ранжирования занимались Р. Л. Кини, Х. Райфа, В. В. Подиновский, В. Д. Ногин, В. Д. Мазуров, В. И. Жуковский и др.

Проблемы разработки показателей безопасности производственного процесса исследовали Т. Рокуэлл, У. Таррантс, В. Х. Хайнрих, Э. Хопкинс и Э. Хейл. Б. Тернер, развивая эпидемиологические модели применительно к построению репрезентативных индикаторов и показателей безопасности на производстве, ввёл в рассмотрение концепцию «периода инкубации крупных аварий» – период слабых сигналов, предшествующих появлению серьезных аварий. Теоретические оценки того, насколько и каким образом корректно можно группировать различные значения объясняющих факторов – вопрос, достаточно глубоко проработанный в теории информации и теории планирования эксперимента (С. Кульбак, С. А. Саркисян, С. П. Марпл и другие). Вопросы рациональной политики в области обеспечения безопасности и защищённости объектов критической инфраструктуры рассматривали М. Гарсиа, А. В. Измайлов, В. В. Никитин, Н. Н. Радаев, А. В. Бояринцев, А. В. Ничиков, В. В. Лесных, С. М. Сендеров, И. А. Ушаков и другие.

Несмотря на проработанность отдельных направлений, имеющиеся на сегодняшний день методы решения задач обеспечения безопасности не полностью учитывают особенности структурной связности ОКВИ и важности работы конкретного объекта для смежных систем и подсистем ССТС.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы состоит в развитии и обобщении теоретических основ и практических методов анализа, оценки и ситуационного управления безопасным и устойчивым функционированием Единой системой газоснабжения в нештатных и чрезвычайных ситуаци-

ях для обоснования мероприятий по снижению риска их возникновения за счёт совершенствования технологий прогнозирования и выявления угроз в условиях существующих ресурсных ограничений.

Для достижения цели диссертационного исследования решен ряд взаимосвязанных задач:

- выполнен системный анализ объекта и предмета исследования;
- проанализированы существующие ограничения (ресурсные, технологические, людские), а также пространство возможных угроз и альтернатив в задаче обеспечения и ситуационного управления безопасным и устойчивым функционированием ЕСГ;
- развиты теоретические положения и обоснована методология анализа, оценки и ситуационного управления безопасным и устойчивым функционированием ЕСГ;
- выбраны и обоснованы критерии эффективности принятия управленческих решений, направленных на обеспечение и повышение безопасности и устойчивости функционирования ЕСГ;
- исследованы устойчивость и непротиворечивость результатов реализации разработанных методов и алгоритмов оценки;
- разработаны программно-алгоритмические решения для обоснования управленческих решений при формировании и обосновании бюджетов инвестиционных программ ПАО «Газпром» по совершенствованию системы безопасности объектов ЕСГ и соответствующие методы расчетов;
- выработаны практические рекомендации по обоснованию достаточности уровней безопасного и устойчивого функционирования ЕСГ.

Область исследования. Работа выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.26.02 — Безопасность в чрезвычайных ситуациях (по отраслям): п. 1. Исследование актуальных проблем обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях (ЧС) природного, техногенного, биолого-социального и военного характера; п. 4. Разработка научных основ систематики и классификации ЧС, ранжирования потенциально опасных объектов по степени опасности для населения и территорий по показателям риска; п. 5. Разработка теории и методологии управления риском ЧС, обоснование критериев и социально-приемлемых уровней риска; п. 7. Исследование проблем управления и методов принятия решений в ЧС, разработка научных основ развития систем управления, связи и оповещения, создания автоматизированных информационно-управляющих систем; п. 8. Разработка научных основ создания и совершенствования систем и средств прогнозирования и мониторинга ЧС; п. 9. Разработка методологии прогнозирования природных и техногенных опасностей, рисков возникновения ЧС, динамики и их последствий, оценки ущерба; п. 18. Исследование проблем повышения устойчивости объектов жизнеобеспечения в условиях воздействия поражающих факторов источников ЧС, научное обоснование комплексов мероприятий по подготовке систем жизнеобеспечения к ЧС.

Объект исследования: процессы обеспечения и ситуационного управления безопасного и устойчивого функционирования ЕСГ в нештатных и чрезвычайных ситуациях.

Предмет исследования: теоретические положения и практические методы, алгоритмы и информационные технологии синтеза, анализа, оценки и ситуационного управления, обеспечивающие комплексную поддержку принятия решений в области прогнозирования и выявления угроз (включая слабо формализованные) безопасного и устойчивого функционирования ЕСГ в нештатных и чрезвычайных ситуациях.

Научная новизна выполненного исследования состоит в получении следующих новых научных результатов:

а) разработана адаптивная методология обеспечения рационального уровня безопасности эффективного функционирования и устойчивого развития ЕСГ, включающая методы и критерии принятия решений по таким проблемам расчётного обоснования комплексной безопасности, как ранжирование больших совокупностей разнородных ОКВИ, входящих в состав рассматриваемой системы и оптимизация распределения необходимых для её защиты ресурсов;

б) предложены и обоснованы принципы построения системы показателей и индикаторов нештатных и чрезвычайных ситуаций на объектах ЕСГ, развиты теоретические основы построения диагностирующей автоматизированной советующей системы и обоснованы правила прогнозирования и соответствующие алгоритмы оценки угроз;

в) разработана модель оценки уровней воздействия негативных факторов и выполнено обоснование шкалы измерения угроз нарушения безопасности эффективного функционирования и устойчивого развития ЕСГ с учетом технологической специфики её объектов и региона их размещения;

г) разработано и внедрено инновационное программно-алгоритмическое обеспечение ранжирования объектов ЕСГ по критерию их системной значимости, позволяющее получить комплексное решение проблем безопасности, возникающих при формировании среднесрочных инвестиционных целевых программ оснащения объектов ПАО «Газпром», и позволяющее научно обосновать и оптимизировать расходы на обеспечение комплексной безопасности объектов.

Практическая значимость работы. Полученные в работе результаты в виде методик, верифицированных и аттестованных в надзорном органе программ, корпоративных стандартов и рекомендаций используются в ПАО «Газпром» и доказали свою высокую эффективность. Результаты диссертационного исследования использованы при разработке нормативных и методических документов и средств автоматизации и поддержки принятия решений по повышению безопасности и устойчивости функционирования ЕСГ.

Результаты исследований отмечены премией в области науки и техники ПАО «Газпром» за 2015 г. и могут применяться при совершенствовании действующих и разработке новых норм и правил комплексной безопасности для ОКВИ как в ПАО «Газпром», так и в ТЭК России.

Методология и методы исследования. При выполнении работы применена методология теории систем, использованы методы теории множеств, математической логики, теории графов, теории автоматов, методы нейрокомпьютинга, включая методы нелинейной оптимизации и другие методы описания и анализа данных.

Основные положения, выносимые на защиту. Автором развиты теоретические основы создания и совершенствования средств мониторинга и прогнозирования нештатных и чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах ЕСГ, разработаны научные основы их ранжирования по показателям риска. Развита методология прогнозирования природных и техногенных опасностей, рисков возникновения нештатных и чрезвычайных ситуаций применительно к задачам ситуационного управления и обеспечения безопасного функционирования и устойчивого развития ЕСГ. Разработаны прикладное программное обеспечение и алгоритмы соответствующих расчётных моделей.

На защиту выносятся следующие положения:

- постановка проблемы обеспечения безопасности сложных технических систем в условиях возникновения нештатных и чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и антропогенного характера;

- методология обеспечения рационального уровня безопасности для надёжного функционирования и устойчивого развития ЕСГ;

- подходы, методы и критерии ранжирования (в целях обеспечения безопасности) больших совокупностей разнородных производственных объектов, входящих в состав ЕСГ;

- теоретические принципы построения системы показателей и индикаторов нештатных и чрезвычайных ситуаций на объектах ЕСГ и общие функциональные требования к диагностирующей автоматизированной советующей системе;

- правила прогнозирования, количественные методы анализа и алгоритмы оценки рисков и слабо формализованных угроз функционированию ЕСГ на основе предложенной системы показателей и индикаторов нештатных и чрезвычайных ситуаций на объектах ЕСГ с учетом их технологической специфики и регионов их размещения;

- результаты расчетно-экспериментальных исследований (программно-методические разработки, результаты верификации, моделирования, экспериментального обоснования разработанных методов и алгоритмов), по обоснованию достаточности уровня безопасности для обеспечения надёжного функционирования и устойчивого развития ЕСГ.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. При разработке расчетных методик, моделей и вычислительных программ использованы основополагающие гипотезы и методы системного анализа объекта исследования, экспертные методы поддержки принятия решений, включающие в себя интуитивно-логический анализ исследуемой проблемы и методы интеллектуального анализа данных, аппарат нечёткой логики, численные методы, инструмен-

тальные средства обработки больших статистических выборок данных.

Верификация программ и расчетных моделей выполнена путём сопоставления с результатами, полученными по другим вычислительным программам, а также сравнением результатов расчета с экспериментальными данными и экспертными оценками.

Реализация результатов. Результаты диссертационной работы внедрены в практику деятельности Департаментов и Управлений ПАО «Газпром», ответственных за разработку и реализации политики производственной безопасности, ситуационного управления, управления закупочной деятельностью и Службы корпоративной защиты ПАО «Газпром» в виде методик, программных средств, расчетных моделей, критериев и рекомендаций.

Сформировавшаяся система исследования, анализа и обеспечения безопасности и устойчивого развития больших совокупностей объектов критической инфраструктуры, и накопленный опыт её применения позволяет успешно разрабатывать универсальные методы и подходы к исследованию похожих систем в других отраслях экономики России.

Апробация работы. Выносимые на защиту положения, модели и алгоритмы, а также результаты их использования многократно апробированы обсуждениями на различных конференциях и семинарах, публикациями, защитой проектов перед отечественными и зарубежными заказчиками.

Результаты работы обсуждались на: III Научно-практической конференции «Совершенствование гражданской обороны в РФ», г. Москва, 10.10.2006; SRA 2006 Annual Meeting Risk Analysis in a Dynamic World: Making a Difference December 3-6, 2006 - Baltimore, Maryland; International Workshop on Natural Disasters & Emergency Management, September 22-24, 2007, Beijing, China; конференции «Безопасность морских объектов» (SOF-2007), 30-31.10.2007, ВНИИГАЗ, Москва; международной научной школе Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах, Санкт-Петербург (МАБР-2007, МАБР-2008, МАБР-2009, МАБР-2012, МАБР-2014); конференции ISANP-2009, July 29 – August 1, 2009, Pittsburgh, USA и ISANP-2011, Sorrento (Naples - ITALY) June 15-18, 2011; III Всероссийская конференция и XIII Школа молодых ученых Безопасность критических инфраструктур и территорий, Екатеринбург: УрО РАН, 2009; конференции «Ситуационные центры и информационно-аналитические средства поддержки принятия решений», Российская академия государственной службы при Президенте РФ, 27-28.04.2010; II-й международной научно-практической конференции «Эффективное управление комплексными нефтегазовыми проектами», 21-24.10.2010, Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта; XIX научно-практической конференции «Ситуационные центры 2011» (ситуационные центры и «электронное правительство», РАГС при Президенте РФ, 26-27.04.2011; V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием XIV Школы молодых ученых «Безопасность критических инфраструктур и территорий» и Семинара «Технологии безопасности критических инфраструктур», Екатеринбург: УрО РАН, 2011; семинаре Россия-НАТО

«Сопоставительный анализ воздействия технологического и интеллектуального терроризма на сложные технические системы», 5-7.04.2011, г. Москва; конференции «Система распределенных ситуационных центров» (СРСЦ-2014, 16-17.10.2014, г. Воронеж и СРСЦ-2015, 06-09.10.2015, г. Ярославль); конференции ICDQM-2016 (г. Приевор, Сербия, 28.06-01.07.2016) и др.

Публикации. По теме исследования опубликовано 64 работы, отражающих основные положения исследования, среди которых – 3 монографии и два раздела в монографиях, 12 публикаций в перечне рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора наук.

Личный вклад автора. Автором внесен существенный вклад в становление и развитие системы комплексного обоснования безопасного и устойчивого функционирования объектов нефтегазовой отрасли. Это касается методических вопросов по заданию требований, оценке и обеспечению инженерно-технической защищенности объектов газовой промышленности, обоснованию целевых мероприятий физической защищенности больших совокупностей объектов охраны ПАО «Газпром». Автор принимал участие в постановке и решении научных задач по рассматриваемым проблемам, включая разработку нормативно-методического обеспечения, расчётных методик и программного обеспечения, руководил выполнением соответствующих НИОКР.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы из 277 наименований и 4 приложений, и изложена на 385 страницах машинописного текста, включающего 105 рисунков и 48 таблиц.

Работа выполнена при поддержке гранта Председателя Правления ПАО «Газпром» для подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора наук (приказ ПАО «Газпром» от 17.02.2016 г. № 100).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, рассмотрены ключевые проблемы обеспечения безопасности и устойчивого развития структурно-сложных технических систем, включающих ОКВИ, обоснована актуальность, выбор объекта и предмета исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе с системных позиций проанализированы объект и предмет исследования. Основное внимание автором уделено безопасности как свойству системы (объекта) выполнять свои функции без нанесения ущерба обслуживающему персоналу, окружающей среде и пр. Показано, что оптимальное обеспечение безопасности ЕСГ заключается в умении находить баланс в перераспределении имеющихся в распоряжении собственника компании ресурсов (материальных, людских, информационных) между «производственной деятельностью» и «поддержанием потенциала развития» (Рис. 1).

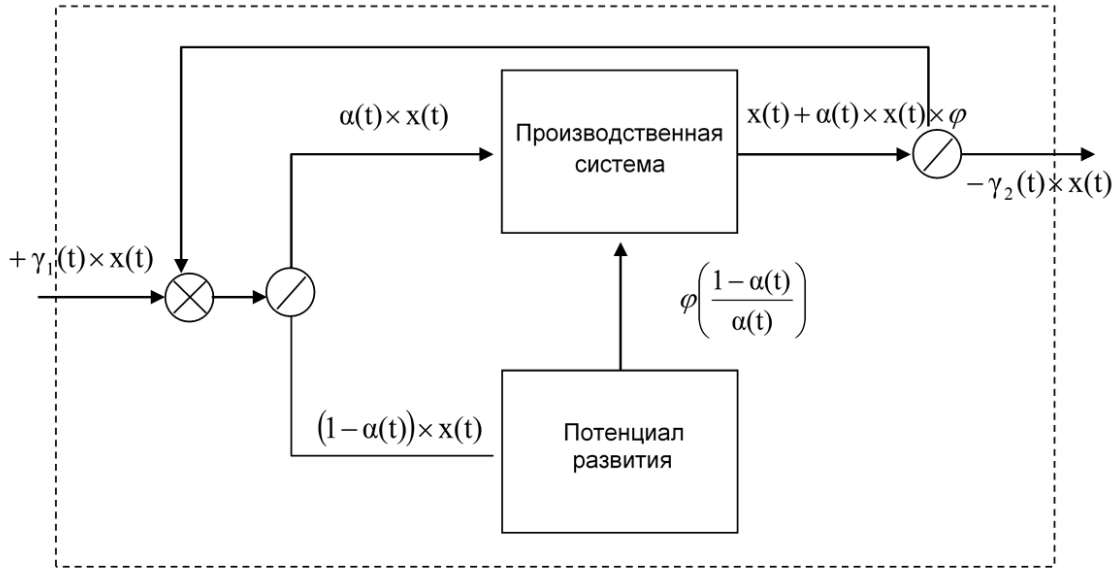


Рисунок 1. Модель развивающейся системы

«Производственная подсистема» приносит прибыль пропорционально количеству получаемых ресурсов $(\alpha(t) \times x(t))$ с некоторым положительным коэффициентом скорости их прироста $\varphi\left(\frac{1-\alpha(t)}{\alpha(t)}\right)$. Развитие системы при этом описывается однородным линейным уравнением по переменной $x(t)$ при параметрах α и γ

$$\frac{dx(t)}{dt} = \alpha(t) \times x(t) \times \varphi\left(\frac{1-\alpha(t)}{\alpha(t)}\right) + \gamma \times x(t). \quad (1)$$

Оптимальная пропорция $\alpha^*(t)$ между производственной системой и потенциалом её развития определяется из условия

$$\alpha^* \times \varphi\left(\frac{1-\alpha^*}{\alpha^*}\right) \rightarrow \max. \quad (2)$$

При естественном предположении, что $\varphi(\xi)$ – это монотонная функция с насыщением (Рис. 2) существует простой способ определения её оптимума, поскольку $\alpha = \left(\frac{1}{1+\xi}\right)$.

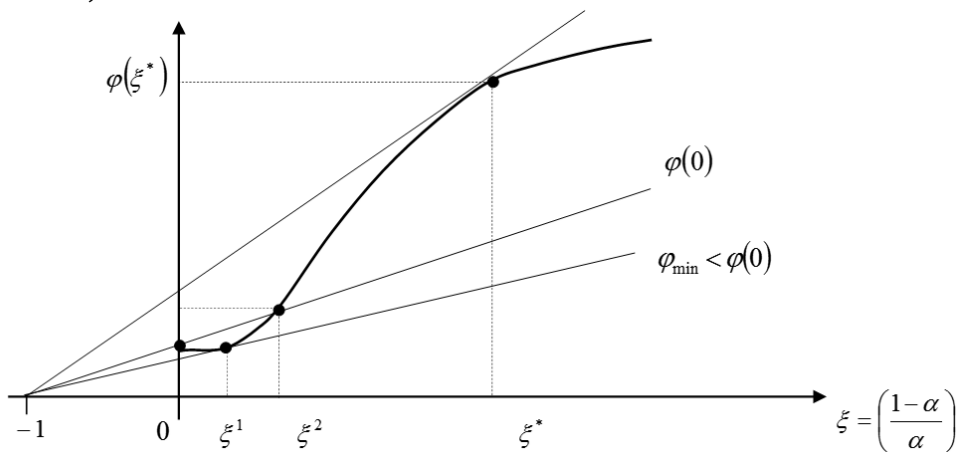


Рисунок 2. Зависимость «потенциала развития» от затраченных средств

Этот оптимум достигается в некоторой точке ξ^* . Если ресурсов на развитие потенциала выделено «чрезмерно много» ($\xi > \xi^*$), то средства ($\xi - \xi^*$) некорректно изъяты из текущего воспроизводства и возникает ситуация, когда затрачиваются усилия на изучение и противодействие многочисленным рискам с которыми развивающаяся система может никогда и не столкнуться. Точка $\xi = 0$ на Рис. 2 соответствует ситуации, когда все ресурсы тратятся исключительно на рост производственной системы. Потенциал подобной системы низок из-за постоянных потерь, которые можно избежать, если имеется потенциал для предвидения возникающих рисков и борьбы с ними. Участок $\xi = (0, \xi^1)$ показывает, что если средства, выделяемые на изучение и противодействие угрозам и рискам малы, то отдача от подобных исследований и поведённых мероприятий меньше выделенных на них ресурсов. При $\xi = (\xi^1, \xi^*)$ вклад в потенциал развития начинает давать положительную отдачу, однако только в точке ξ^2 будет достигнут уровень «самоокупаемости» затрат на развитие «потенциала» системы $\varphi(\xi^2) = \varphi(0)$. Поэтому целесообразно рассматривать эту точку как точку «критического» положения. Снижение потенциала $\varphi(\xi)$ до уровня $\varphi(\xi^2)$ угрожает тому, что «в силу обстоятельств» экономически целесообразно окажется «стратегия выживания» – стратегия полного отказа от затрат на решение задач предвидения и упреждения угроз и рисков, и обеспечения воспроизводства лишь за счёт наращивания низкоэффективных мощностей в производственной подсистеме $\xi \rightarrow 0$.

Автором разработана методология обеспечения безопасности и устойчивости ЕСГ, оперирующая пятью ключевыми, неразрывно связанными между собой методами, решающими задачи, возникающие при построении подсистем, обеспечивающих безопасность и устойчивость ЕСГ в условиях возникновения нештатных и чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и антропогенного характера.

Первый метод – метод синтеза функции риска. Получаемые в результате применения этого метода данные и функциональные зависимости являются исходными для прочих этапов процесса обеспечения безопасности ОКВИ.

Второй метод – обеспечивает поддержку принятия решения ЛПР в задаче группового выбора (под которой понимается задача анализа и агрегирования разнородной информации о предпочтениях сравниваемых объектов в единое «групповое» предпочтение) ОКВИ ЕСГ, требующих повышенного внимания службы безопасности и затрат ресурсов государства и собственника системы на обеспечение их защищённости, безопасности и устойчивости функционирования. Разработке этих методов посвящена глава 2 настоящего исследования.

Третий метод – метод идентификаций нештатных и чрезвычайных ситуаций (как предвестников возможных ЧС), возникающих при функционировании ОКВИ и выявление ключевых факторов, оказывающих негативное влияние на безопасное функционирование и устойчивое развитие ЕСГ. Последнее обстоятельство способствует выбору лицом, принимающим решение (ЛПР) наилучшего среди возможных алгоритма управления системой (с непосредственно

следующими отсюда структурой и параметрами соответствующей подсистемы управления, и определением предельно достижимой эффективности ЕСГ). Метод описан в глава 3.

Четвёртый метод – метод диагностики поведения всей управляемой системы (ЕСГ) в условиях существования слабо формализованных угроз (СФУ) её функционированию. Применение данного метода позволяет получить «системный отклик», выражающийся в событиях, происходящих в ЕСГ. Именно на основании математической модели достаточно полно характеризующей исследуемую систему, оказывается возможным сделать основные выводы о её свойствах в задаче оптимизации, целесообразных методах по обеспечению её безопасности, их достаточности и эффективности. Рассмотрению этого метода посвящена глава 4.

Пятый метод – метод построения интегрального показателя безопасности ЕСГ, то есть получение адекватного аппарата построения оптимальных процессов дискретной обработки непрерывных данных, поступающих от системы, снижение размерности её описания с целью повышения оперативности принятия управляющих решений, обеспечивающих её устойчивое функционирование даже при наличии внешних воздействий различной природы. Разработке этого метода посвящена глава 5.

Методология обеспечения безопасности функционирования и устойчивости единой системы газоснабжения в чрезвычайных ситуациях, разработанная автором, представляет собой совокупность упомянутых методов, правил и процедур анализа информации о ЕСГ и её окружении, предназначенных для поддержки принятия решений о рациональном распределении ресурсов с учётом требований федерального законодательства об ответственности собственников объектов ТЭК за недопущение возникновения чрезвычайных ситуаций и существенных бюджетных ограничений.

Автором осуществлено применение методологии в решении широкого круга проблем, что подчёркивает её универсальность. В отличие от существующих методологий предложенная автором методология позволяет: исследовать данные, описывающие анализируемую систему в парадигме риск-ориентированного подхода к вопросам обеспечения безопасности и устойчивости функционирования, не теряющей актуальности на протяжении последних десятилетий. Область применения методологии – разработка проактивных индикаторов и показателей ситуаций, формирующих проактивную культуру производственной безопасности ПАО «Газпром». Взаимосвязь перечисленных методов иллюстрирует Рис. 3.

Автором предложено для оценки системной значимости объектов (уровня угрозы нештатной или чрезвычайной ситуации) ЕСГ использовать иерархическую многокритериальную модель, являющуюся результатом синтеза собираемых системой мониторинга первичных данных процесса обеспечения безопасности и устойчивого функционирования в осмысленную структуру.

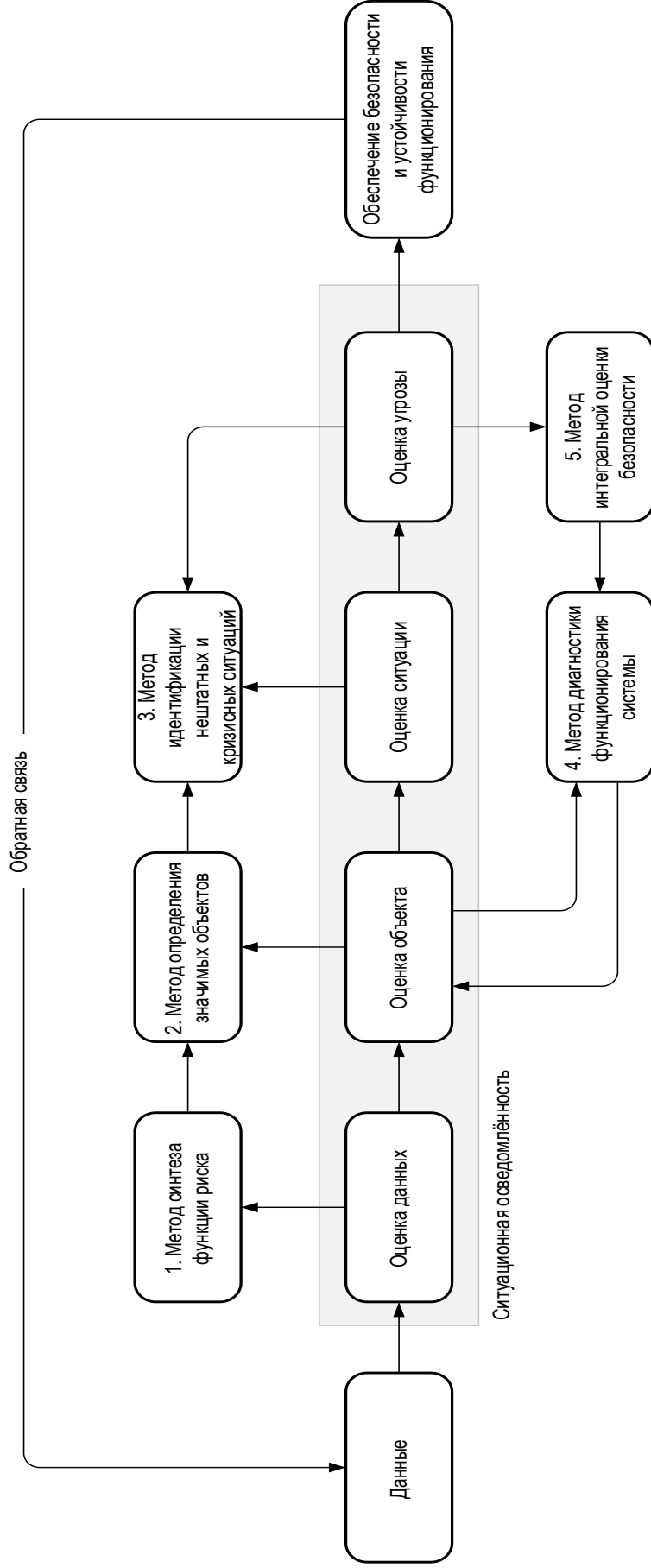


Рисунок 3. Методология обеспечения рационального урочья безопасности функционирования и устойчивости ЕСГ

Интегральный риск нештатной ситуации $R(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n)$ при этом представляет собой функцию рисков возникновения частных нештатных ситуаций r_i ($i = 1, \dots, n$).

Вид зависимости R выбирается исходя из условий: $0 \leq R(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n) \leq 1$; $R(0, \dots, 0, \dots, 0) = 0$; $R(0, \dots, r_i, \dots, 0) = r_i$ и $0 \leq R(r_1, \dots, 1, \dots, r_n) = 1$ для $\forall r_i = 1$ независимо от значений других аргументов.

Непрерывная функция, удовлетворяющая этим условиям, имеет вид:

$$R(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n) = 1 - \{\prod_{i=1}^n (1 - r_i)\} \times g(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n), \quad (3)$$

где $g(0, \dots, r_i, \dots, 0) = 1$.

Если в частном случае $g(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n) \equiv 1$, то, соответственно:

$$R(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n) = 1 - \{\prod_{i=1}^n (1 - r_i)\}, \quad (4)$$

что даёт заниженную оценку интегрального риска из расчёта, что поток нештатных ситуаций представляет собой смесь ординарных событий, взятых из однородных, но различающихся значениями r_i выборок.

Поскольку для реальных систем риски, как правило, зависимы, то

$$g(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n) = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} \times [r_i]^{\alpha_{ij}} \times [r_j]^{\beta_{ij}}, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} \leq 1, C_{ij} \geq 0, \alpha_{ij} > 0, \beta_{ij} > 0, \quad (6)$$

где C_{ij} - коэффициенты связности рисков i -ой и j -ой нештатной ситуации; α_{ij} и β_{ij} - положительные коэффициенты эластичности замены соответствующих рисков, позволяющие учитывать факты «замещения» рисков, обусловленные главным образом тем, что одновременно эффективно мероприятия по снижению всех рисков проведены быть не могут из-за ограниченности у ЛПР времени и ресурсов.

Для учёта этих факторов автором предложено синтезировать функцию риска ОКВИ ЕСГ (r_i) как произведение четырёх составляющих:

$$r_i = r_i^{(a)} \cdot r_i^{(b)} \cdot r_i^{(c)} \cdot r_i^{(d)}, \quad (7)$$

где $r_i^{(a)}$ – показатель, оценивающий недопоставки продукции по сравнению с идеальным режимом функционирования ЕСГ как системы в целом, является расчётным и тесно связанным с показателем мощности объекта ЕСГ, рассчитываемый с помощью соответствующих моделей и оценивающийся через категоричность задач, выполнение которых отменяется или задерживается вследствие возникшей нештатной или чрезвычайной ситуации; $r_i^{(b)}$ – поправочный коэффициент, учитывающий все категории потребителей (например, в соответствии с очередью отключения) и топологию их размещения в регионе, на функционирование которых влияет снижение производительности данного объекта (оценивает важность выполнения единицы работы); $r_i^{(c)}$ – показатель потенциальной осуществимости негативного события (уровень «агрессивности» внешней среды); $r_i^{(d)}$ – поправочный коэффициент, характеризующий условную уязвимость типа объектов и нормирующий среднюю доступность точек приложения поражающих средств, в зависимости от «компоновочных характеристик» объектов в ЕСГ, корректирующий величины эффектов от поражения.

Предложенная схема синтеза функционала интегрального риска R пригодна для предварительного анализа вариантов развития системы на основе иерархии показателей, характеризующих все аспекты нештатных ситуаций, включая как оценки последствий $r_i^{(a)}$ и $r_i^{(b)}$, так и оценки причин $r_i^{(c)}$ и $r_i^{(d)}$. Введённые базовые показатели строятся через свёртки ресурсных показателей, имеющих натуральное выражение. Для описания связей между показателями введён в рассмотрение направленный граф. Специфика использования свёртки показателей в виде мультипликаторов связана с тем, что восприятие ожидаемых потерь органами чувств человека имеет логарифмическую шкалу.

Показано, что для адекватной оценки текущего состояния ЕСГ необходимо иметь: полную систему индикаторов её состояния и состояния внешней (конкурентной) среды, генератор конечного обозримого количества возможных сценариев развития системы и функцию оценки состояния. Даже при плавном изменении состояния системы необходимо учитывать фактор накопления случайностей и разрабатывать индикаторы-предвестники оценки близости системы к границам потери устойчивости развития. Показано, что с позиций системологии потеря устойчивости развития такой системы проявляется на нескольких иерархически связанных уровнях (прочности, надёжности, живучести и самоорганизации), каждый из которых требует отдельного обстоятельного анализа.

Таким образом, автором показано, что основой современных систем мониторинга угроз должна стать концепция управления рисками, суть которой заключается в формировании механизмов, методов и инструментов, с помощью которых возможно не только выполнить оценку существующих для исследуемой системы рисков и угроз, но и прогнозировать их появление и развитие в будущем. Показано, что разработку и внедрение подсистемы прогноза состояния безопасности ОКВИ, основанной на расчёте количественных и качественных показателей рисков и индикаторов угроз, целесообразно проводить с применением методологии систем раннего оповещения. Особое внимание при этом необходимо уделить влиянию факторов риска на систему сбалансированных показателей безопасности и рисков, поскольку прогнозирование по единичным показателям не даёт целостной картины тенденций развития и состояния системы. Риск в области безопасности и устойчивости ЕСГ следует рассматривать как многокомпонентный вектор, набор параметров которого может меняться. Реальная оценка уровня безопасности на основе использования риск-ориентированного подхода невозможна без достаточно информативной базы относительно количественных и качественных характеристик факторов рисков и, с другой стороны, данных о состоянии объектов и технологического процессов на них, которые испытывают влияние этих факторов риска без развития полноформатной системы мониторинга. Показано, что контроль объекта мониторинга должен быть организован таким образом, чтобы можно было вовремя провести управленческие решения, если состояние объекта приближается к опасной зоне.

Во второй главе автором решена проблема обоснованного группового выбора, заключающаяся в сведении частных оценок о порядке предпочтения некоторых объектов (например, ОКВИ разных типов, входящих в состав ЕСГ) в единое «групповое» предпочтение. Проблема состоит в следующем. Существует набор исходных признаков $x = (x_1, \dots, x_n)$, каждый из которых необходим, а все они вместе – достаточны для полного, всестороннего оценивания исследуемого ОКВИ. Полагается возможным сформировать вектор $q = (q_1, \dots, q_m)$ отдельных показателей, представляющих собой функции $q_i(x)$ $i = 1, \dots, m$, которые оценивают различные аспекты исследуемого объекта с использованием m различных критериев. Необходимо выбрать вид синтезирующей функции $Q(q)$, сопоставляющей вектору отдельных показателей $q = (q_1, \dots, q_m)$ сводную оценку Q (значение сводного показателя $Q = Q(q)$), характеризующую исследуемый объект в целом. При этом обычно предполагается, что синтезирующая функция $Q(q)$ зависит от вектора $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_m)$ положительных параметров $\omega_1, \dots, \omega_m$, при $\omega_1 + \dots + \omega_m = 1$, определяющих значимость отдельных показателей q_1, \dots, q_m для сводной оценки Q соответственно: $Q = Q(q) = Q(q; \omega)$. Выбранная синтезирующая функция позволяет, как правило, выполнить ранжирование в рамках однотипных объектов (в случае ЕСГ речь идёт о КС, ГРС, АГНКС или ПХГ), однако задача построения единого ранжированного перечня остаётся неразрешимой. Исходя из допущения, что в предельном случае важность объекта для нарушителя совпадает со значимостью этого объекта для собственника, предложено оценку системной значимости объектов ЕСГ проводить, используя математический аппарат теории игр и, в более общей постановке, теории конфликтующих систем.

Разработанный автором метод позволяет обосновано выбрать объекты первоочередного оснащения (ОКВИ), требующие повышенного внимания службы безопасности и затрат ресурсов собственника системы для обеспечения безопасного функционирования и устойчивого развития ЕСГ. В основу разработанного метода ранжирования больших совокупностей разнородных производственных объектов, входящих в состав ЕСГ положен алгоритм синтеза показателя риска ОКВИ с точки зрения влияния неопределённостей внешних (особенно преднамеренных) и внутренних воздействий и обстоятельств на цели функционирования системы. Внешние преднамеренные воздействия рассмотрены более детально. Возможные нарушители классифицируются по уровню подготовленности j ($j = 0, 1, \dots, J$). Считается, при этом, что на реализацию атаки нарушителем j -го уровня потребуется Z_j единиц ресурсов. Поскольку суммарные ресурсы (Z) у нарушителей ограничены, моделью интегрального профиля нарушителей будет являться кортеж количества (интенсивности) атак соответствующего уровня подготовленности $\vec{N} = \{N_0, N_1, \dots, N_J\}$. Введение этих ограничений позволяет исключить «крайние» варианты: условия террористической или диверсионной войны, когда значение Z велико, а также условия массового всплеска преступности низкого уровня подготовленности. В результате предполагаемой атаки того или иного уровня подготовки на некоторый (k -й) объект

ЕСГ, этому объекту, через его полный (или частичный) выход из работоспособного состояния, будет нанесён определённый ущерб (X).

$$N_j \leq N_{j,\max} \quad (j = 0, 1, \dots, J), \quad \sum_{j=0}^J (N_j \times Z_j) \leq Z. \quad (8)$$

С учётом того, что не каждая атака априори приводит к успеху нападающей стороны, предложено профиль защиты k -го объекта описывать интервальными представлениями посредством задания четырех матриц:

$$Q_{\min}^{[k]}(i, j), Q_{\max}^{[k]}(i, j), X_{\min}^{[k]}(i, j), X_{\max}^{[k]}(i, j), \quad (9)$$

где i ($i = 0, 1, \dots, I^{[k]}$) - уровень защиты k -го объекта (нулевой уровень ($i = 0$) соответствует текущему состоянию защиты).

Величины (9) растут по мере роста уровня подготовленности «нападающей» стороны j и снижаются по мере возрастания уровня защищённости объекта i . Обозначая величину затрат на создание и поддержание защиты объекта k на i -ом уровне как $Y^{[k]}(i^{[k]})$ и учитывая ограниченность суммарного ресурса, выделяемого на защиту всех объектов, получаем:

$$\sum_k Y^{[k]}(i^{[k]}) \leq Y, \quad (10)$$

где Y - сумма всех затрат на защиту объектов при условии, что для каждого объекта k выбран вариант системы защиты $i^{[k]}$.

Автором показано, что при условии отсутствия у преступников преимущества выбора цели и варианта воздействия, «оптимальный» профиль защищённости объектов мог бы быть достигнут посредством последовательного выполнения следующего алгоритма:

Шаг 1. Оценить вероятности $\lambda^{[k]}(j)$ атаки каждого k -го объекта противником j -го уровня подготовленности;

Шаг 2. Рассчитать медианное значение риска от реализации атаки k -го объекта противником j -го уровня подготовленности при $i^{[k]}$ -ом варианте реализации системы защиты объекта:

$$R[k; i^{[k]}] = \sum_{j=0}^J \left\{ \lambda^{[k]}(j) \times \left(\frac{Q_{\min}^{[k]}(i^{[k]}, j) + Q_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)}{2} \right) \times \left(\frac{X_{\min}^{[k]}(i^{[k]}, j) + X_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)}{2} \right) \right\}. \quad (11)$$

Шаг 3. Определить величину предотвращенного риска на единицу вложенных в защиту средств:

$$\theta[k, i^{[k]}] = \frac{R[k, i^{[k]}]}{Y^{[k]}(i^{[k]})}. \quad (12)$$

Шаг 4. Для каждого k -го объекта выбрать максимальное из значений $\theta[k, i^{[k]}]$:

$$\theta[k, i^{*[k]}] = \max_{i^{[k]}} \{ \theta[k, i^{[k]}] \}, \quad (13)$$

то есть при выбранном варианте $i^{*[k]}$ наблюдается максимальное снижение риска на единицу вложенных средств для k -го объекта.

Шаг 5. составить ранжированный перечень объектов, располагая их по убыванию величины показателя $\theta[k, i^{*[k]}]$;

Шаг 6. Отобрать первые \tilde{K} объектов в списке такие, что суммарные затраты на их защиту не превышают Y .

То есть, нет смысла защищать те объекты, которым ничто не угрожает (малы $\lambda^{[k]}(j)$), нецелесообразно защищать дополнительно те объекты, временная потеря работоспособности которых практически не сказывается на величине суммарных потерь ПАО «Газпром» (малы $X_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)$), и, наконец, дополнительная защита нецелесообразна на тех объектах, которые уже защищены настолько хорошо, что снижение потерь может быть принципиально достигнуто, но затратой неадекватно больших средств (малы $\theta[k, i^{*[k]}]$).

Ключевым моментом предложенного алгоритма является составление ранжированного перечня объектов по критерию минимизации математического ожидания потерь (риска) на единицу вложенных средств в их защиту. Из формул (7) и (11) следует необходимость сбора и оценки данных по величинам потерь, вызванных реализацией атак $X_{\min}^{[k]}(i, j), X_{\max}^{[k]}(i, j)$; по показателю «агрессивности преступной среды» $\lambda^{[k]}(j)$ и по зависимости рисков от типов объектов k . Величины потерь X , вследствие того, что объекты ЕСГ не являются автономными предприятиями, должны отражать системный эффект, который существенно возрастает в зависимости от того, какие из потребителей продукции атакованного объекта пострадают из-за снижения его работоспособности. Необходимо рассматривать не средние, а верхние границы показателей ущерба, и ввести в рассмотрение дополнительно четвертый компонент – показатель важности непрерывного функционирования объекта в связи с каскадным эффектом усиления последствий потери работоспособности объекта для других объектов народного хозяйства (α). И, наконец, необходимо учитывать, что при выборе объекта атаки у нарушителя могут быть неизвестные никому приоритеты, смещающие значения $\lambda^{[k]}(j)$ от «средневзвешенных по отрасли». Данные обстоятельства учитываются введением пятой компоненты – корректирующего коэффициента $\mu^{[k]}$.

Если \tilde{Z} – оценка суммарного ресурса, имеющегося у сил, заинтересованных в нарушении безопасности объектов ЕСГ, то при $\tilde{Z} < Z$ защищающаяся сторона недооценивает возможности противника, а при $\tilde{Z} > Z$ – напротив, имеет место переоценка его сил. Предположено, что выбор нарушителей базируется на их собственной модели ожидаемого ущерба и в их распоряжении имеются четыре аналогичные (10) матрицы для каждого из объектов: $\tilde{Q}_{\min}^{[k]}(i, j), \tilde{Q}_{\max}^{[k]}(i, j), \tilde{X}_{\min}^{[k]}(i, j), \tilde{X}_{\max}^{[k]}(i, j)$ и свое представление о том, сколько ресурсов \tilde{Y} потрачено ПАО «Газпром» на защиту всех объектов ЕСГ. Аналогично, если $\tilde{Y} < Y$, то противник недооценивает возможности защиты объектов, и, если $\tilde{Y} > Y$, то он их переоценивает. Очевидно, что оценки $\tilde{Q}_{\min}^{[k]}(i, j), \tilde{Q}_{\max}^{[k]}(i, j), \tilde{X}_{\min}^{[k]}(i, j), \tilde{X}_{\max}^{[k]}(i, j)$ также могут быть нарушителями как завышены, так и занижены. Тем не менее, в соответствии со своим правом выбора, они выбирают такой набор объектов для атаки и такие варианты подготовленности нарушителей для каждого объекта, при которых наносится максимальный ущерб. Введена характеристическая функция $\delta^{[k]}(i, j)$, означающая,

что против k -го объекта с ожидаемым уровнем защиты i ($i = 0, 1, \dots, I^{[k]}$) выбрана атака уровня j ($j = 0, 1, \dots, J^{[k]}$). Если для всех i значения $\delta^{[k]}(i, j)$ равны нулю, то k -й объект не будет подвержен атаке уровня j . Если при всех j и всех i значения $\delta^{[k]}(i, j)$ равны нулю, то k -й объект при предполагаемом противником варианте целеполагания полностью выбывает из списка целей. Если для некоторого \tilde{i} значение $\delta^{[k]}(\tilde{i}, j(\tilde{i})) = 1$, считаем, что объект k с уровнем защиты 0 выбран противником как цель для атаки уровнем подготовленности $j(\tilde{i})$.

Перечисленные свойства записываются системой равенств:

$$\begin{cases} \forall k \forall i \forall j \delta^{[k]}(i, j) \times (1 - \delta^{[k]}(i, j)) = 0, \\ \forall k (\sum_{i=0}^{I_k} \sum_{j=0}^J \delta^{[k]}(i, j) - 1) \times (\sum_{i=0}^{I_k} \sum_{j=0}^J \delta^{[k]}(i, j)) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Учитывая, что

$$\forall j \sum_{i=0}^{I_k} \sum_k \delta^{[k]}(i, j) = N_j \quad (15)$$

и дополняя (14), (15) системой ограничений (9) мы получаем оценку суммарного ущерба, наносимого противником:

$$\tilde{R} = \sum_k \sum_{i=0}^{I_k} \sum_{j=0}^J \left\{ \delta^{[k]}(i, j) \times \left(\frac{Q_{\min}^{[k]}(i^{[k]}, j) + Q_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)}{2} \right) \times \left(\frac{X_{\min}^{[k]}(i^{[k]}, j) + X_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)}{2} \right) \right\}. \quad (16)$$

Обозначая \tilde{R} как $\tilde{R}(Var_I, Var_J)$, так как \tilde{R} зависит как от варианта защиты объектов Var_I , так и от варианта воздействия Var_J , ищем максимум \tilde{R} для всех вариантов воздействий, удовлетворяющих ограничениям, при рассмотрении всех вариантов оснащения дополнительной защитой в качестве параметров:

$$\tilde{R}^*(Var_I) = \max_{Var_J} \{ \tilde{R}(Var_I, Var_J) \}. \quad (17)$$

Тем самым постулируется, что противник выбирает наихудший для ПАО «Газпром» вариант, и, следовательно, задача защиты сводится к ограничению множества выбора для противника: ищется усиление объектов, минимизирующее $\tilde{R}^*(Var_I)$. При этом задача обеспечения безопасности сводится к поиску равновесного значения \tilde{R}^{**} :

$$\tilde{R}^{**} = \min_{Var_I} \{ \tilde{R}^*(Var_I) \}. \quad (18)$$

Решением задачи в предложенной постановке, известное в теории игр, является равновесие по Нэшу – седловая точка (Var_{I^*}, Var_{J^*}) :

$$\tilde{R}^{**} = \tilde{R}(Var_{I^*}, Var_{J^*}). \quad (19)$$

В этой точке ПАО «Газпром» не выгодно менять стратегию оснащения Var_{I^*} , поскольку вне этой стратегии у противника появляются возможности для нанесения более «чувствительных» ударов. Одновременно, атакующей стороне не выгодно менять свой план $Var_{J^*}(Var_{I^*})$, поскольку любое изменение приводит к снижению суммарных ущербов, которые она стремится нанести объектам ЕСГ, а через них – ТЭК страны и РФ в целом.

Автором разработана адаптивная процедура многокритериального ранжирования для решения задачи выбора объектов первоочередной защиты. Для это-

го, на некотором множестве объектов $O = \{o_1, \dots, o_D\}$ определена логическая функция $\pi: \pi(o) \rightarrow \{0,1\}$ – функция выбора, которая указывает, что альтернатива o отобрана в некоторое подмножество $\pi(o)$ ($\pi(o) = 1$) или нет ($\pi(o) = 0$). Подмножество $\pi(o)$, в частности, может быть подмножеством наиболее системно значимых ОКВИ ЕСГ, или же подмножеством объектов, для которых потенциально необходимо реализовать дополнительные меры защиты. В общем случае, функции выбора могут быть произвольными, но для того, чтобы их использование давало корректное описание актов выбора необходимо на вид $\pi(o)$ наложить ряд ограничений (аксиом выбора), сформулированных автором (аксиомы наследования, отбрасывания и согласия). Множество объектов $O = \{o_1, \dots, o_D\}$, подчиняющееся этим аксиомам называется множеством, оптимальным по Парето.

С учётом сказанного, автором предложен следующий алгоритм ранжирования D объектов $O = \{o_1, \dots, o_D\}$ по их системной значимости.

Шаг 1. Применяя функцию $\pi(O)$, найти наиболее системно важные объекты $\pi(O = O^{[1]+}) = O^{[1]} = \{o_{1,1}, \dots, o_{1,D_1}\}$.

Шаг 2. «Удалить» D_1 объектов, вошедших в $O^{[1]}$ из O , и осуществить выбор на множестве оставшихся объектов $O^{[2]+} = O^{[1]+} \setminus O^{[1]}$.

Шаг 3. Определить D_2 объекта $\pi(O^{[2]+}) = O^{[2]} = \{o_{2,1}, \dots, o_{2,D_2}\}$ с их последующим удалением: $O^{[3]+} = O^{[2]+} \setminus O^{[2]}$.

Шаг 4. Повторять процедуру выбора и удаления на s -ом шаге $s = 3, 4, \dots$:

$$\begin{cases} \pi(O^{[s]+}) = O^{[s]} = \{o_{s,1}, \dots, o_{s,D_s}\}, \\ O^{[s+1]+} = O^{[s]+} \setminus O^{[s]}. \end{cases} \quad (20)$$

до того, как все объекты из O будут «разобраны» по множествам $O^{[s]}$:

$$\begin{cases} O = O^{[1]} \cup O^{[2]} \cup \dots \cup O^{[s]}, \\ D = D_1 + D_2 + \dots + D_s. \end{cases} \quad (21)$$

Правило определения системной значимости: объект тем более значим, чем на более раннем шаге s он выбран в качестве элемента множества $O^{[s]}$. Объекты, оказавшиеся в одном $O^{[s]}$, считаются равнозначимыми.

Решение задачи ранжирования большой совокупности разнотипных объектов автором предложено осуществлять в несколько этапов. На первом этапе для объектов каждого типа необходимо построить частные модели оценки системной значимости объектов выделенного типа и по ним провести ранжирование. На втором этапе – осуществить «сшивку» ранжированных списков объектов в единый перечень. На третьем этапе провести коррекцию значений оценок отдельных объектов там, где потребуются учесть особые условия их функционирования. Предположено для всех альтернатив $x \in X$ задать целевую функцию предпочтения $Q(x)$, такую, что если x_2 предпочтительнее x_1 , то $Q(x_2) > Q(x_1)$. Выбор как максимизация критерия сводится к поиску такого значения $x^* \in X$, при котором достигается максимум $Q(x)$, на множестве X : $x^* = \operatorname{argmax} Q(x)$.

Однотипность объектов предполагает, что для них можно предложить ряд переменных описания (ресурсных критериев) x_1, x_2, \dots, x_N , а также задать ска-

лярную функцию $Q(x_1, x_2, \dots, x_N)$, которая для каждого объекта o принимает значение $Q(x_1(o), x_2(o), \dots, x_N(o))$. Эта функция $Q(x_1, x_2, \dots, x_N)$ называется критерием, если она обладает тем свойством, что, если объект o_2 со значениями $x_1(o_2), x_2(o_2), \dots, x_N(o_2)$, предпочтительней объекта o_1 со значениями $x_1(o_1), x_2(o_1), \dots, x_N(o_1)$, то которая обладает тем свойством, что если альтернатива x_2 предпочтительнее альтернативы x_1 , то $Q(\vec{x}(o_2)) > Q(\vec{x}(o_1))$.

В рассматриваемом случае $Q(x_1, x_2, \dots, x_N)$ – критерий системной значимости объекта, имеющего значения ресурсных критериев x_1, x_2, \dots, x_N . Выбор наиболее системно значимого объекта, если функция $Q(x_1, x_2, \dots, x_N)$ каким-то способом ранее построена, сводится к поиску такого объекта o^* , для которого критерий системной значимости $Q(x_1(o^*), x_2(o^*), \dots, x_N(o^*))$ имеет наибольшее значение. Однако для сложных многоцелевых объектов корректно построить критерий $Q(\vec{x})$ – очень трудоёмкая задача. Наиболее распространенный способ построения – «экспертно» задать оценки $\tilde{Q}(\vec{x})$ некоторой ограниченной совокупности объектов – «обучающей» выборке $O_{Learn} \subset O = \{o_1, o_2, \dots, o_D\}$. Далее, полагая, что истинная функция $Q(\vec{x})$ принадлежит некоторому классу параметризованных функций $Q(\vec{x}, par)$, решаются задачи экстраполяции оценок $\tilde{Q}(\vec{x})$ на всё множество объектов O посредством определения «оптимальной» комбинации параметров par^* , при которой известные значения оценок $\tilde{Q}(\vec{x})$ для объектов из обучающей выборки приближаются наилучшим образом в некоторой метрике $\|\dots\|_\rho$:

$$\sum_{o \in O} \|Q(x(o), par) - \tilde{Q}(x(o))\| \rightarrow \min_{par} . \quad (22)$$

Набор par^* определяет искомую критериальную функцию $Q(\vec{x}) = Q(\vec{x}, par^*)$. После того, как проведена оценка системной значимости объектов различного типа в виде произведения четырех показателей верхнего уровня, в нашем распоряжении имеется набор упорядоченных списков V оценок различной длины: $V = \{V_1, V_2, \dots, V_T\}$. Здесь индекс $t = 1, \dots, T$ указывает на тип объекта. Индекс d указывает на порядковый номер оценки $X_{t,d}$ в списке оценок системной значимости объектов t -го типа, а $O_{t,d}$ является указателем на объект, к которому относится эта оценка. Каждый список упорядочен по убыванию значений $X_{t,d}$, причём в начале списка стоит объект t -го типа с наибольшим значением оценки системной важности по оценке в шкале выделенного типа:

$$V_i \mapsto \langle (X_{i,1}; O_{i,1}), \dots, (X_{i,d}; O_{i,d}), \dots, (X_{i,D_i}; O_{i,D_i}) \rangle. \quad (23)$$

Необходимо построить общий список объектов по убыванию их оценок системной важности в некоторой общей универсальной шкале:

$$V \mapsto \langle (Y_1; O_1), \dots, (Y_d; O_d), \dots, (Y_D; O_D) \rangle. \quad (24)$$

Естественно, что длина такого списка D равна сумме длин всех исходных списков: $D = D_1 + D_2 + \dots + D_T$. Поскольку оценки $X_{t,d}$ строились на перечнях показателей, описывающих различные типы объектов, механическое объединение списков V_t не является корректным, необходимо учесть дополнительную информацию, которая может быть двух видов. Во-первых, это утверждения ти-

па «равенство» ($X_{t_1,d_1} = X_{t_2,d_2}$), которые означают, что объект типа t_1 , стоящий в списке V_{t_1} на d_1 -м с начала списка месте равен по общей шкале системной значимости объекту типа t_2 , стоящему в списке V_{t_2} на d_2 -м месте. Во-вторых, это утверждения типа «неравенство» ($X_{t_2,d_2-1} > X_{t_1,d_1} > X_{t_2,d_2}$), показывающее, что объект типа t_1 , стоящий в списке V_{t_1} на d_1 -м с начала списка месте по общей шкале системной значимости более значим нежели объект типа t_2 , стоящему в списке V_{t_2} на d_2 -м месте ($X_{t_1,d_1} > X_{t_2,d_2}$), но уступает по значимости предстоящему в этом списке объекту X_{t_2,d_2-1} : ($X_{t_2,d_2-1} > X_{t_1,d_1}$). Любое утверждение этого типа сводится к утверждению первого типа путём введения «фиктивного» объекта, имеющего показатель $X_{t_2,d_2-1/2}$, удовлетворяющий равенству ($X_{t_2,d_2-1/2} = X_{t_1,d_1}$). Автором показано, что возможны три принципиально различных случая сравнения (Рис. 4).

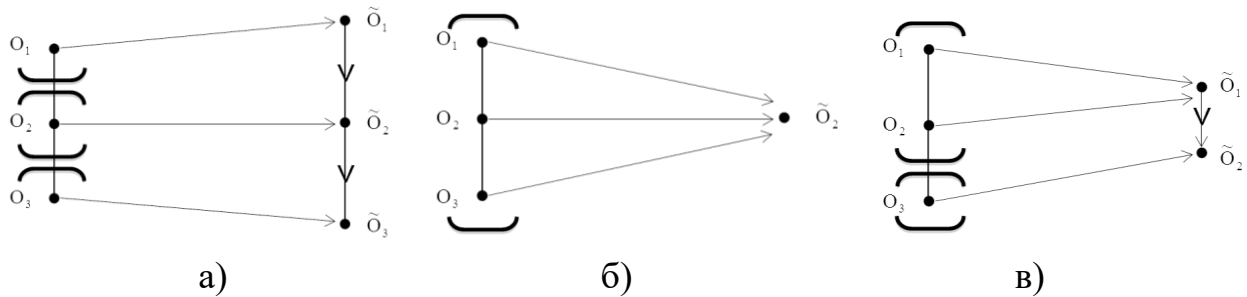


Рисунок 4. Случаи сравнения объектов разных типов

Случай А. Каждый из объектов экспертно признается равным соответствующему объекту $O_1 \sim \tilde{O}_1, O_2 \sim \tilde{O}_2, O_3 \sim \tilde{O}_3$ (Рис. 4а).

Случай Б. Все объекты экспертно признаются равными одному и тому же объекту \tilde{O}_2 (Рис. 4б).

Случай В. Первые два объекта экспертно признаются равными одному и тому же объекту \tilde{O}_1 (рис. 4в). Третий же объект равен менее значимому \tilde{O}_2 .

Нечёткое оценивание, заключающееся в принятии в качестве аппарата сравнения нечёткого равенства, приводит к необходимости кластеризации представленных к оцениванию объектов одного типа O_1, O_2, O_3 через сравнение их с объектами другого типа.

Интегральная оценка значимости объекта O - $\|O\|_{\text{int}}(O)$ – рассчитывается через вклады оценок объекта O в шкалах каждого из типов объектов - $\|O\|_{[m]}$ по формуле:

$$\|O\|_{[m]} = \sum_m \rho_m \times \frac{\|O\|_{[m]} - \|B_m\|_{[m]}}{\|T_m\|_{[m]} - \|B_m\|_{[m]}}, \quad (25)$$

где $\|B_m\|_{[m]}$ - значение «фиктивного» ВОТТОМ-объекта в шкале типа m ; $\|T_m\|_{[m]}$ - значение «фиктивного» ТОР-объекта в шкале типа m ; ρ_m - нормированный показатель весомости шкалы типа m ; $\|O\|_{[m]}$ - оценка объекта O в шкале типа m .

Таким образом, автором разработаны научные основы ранжирования ОКВИ ЕСГ по показателю их системной значимости. Показано, что если под устойчивостью функционирования ЕСГ понимать выполнение ею плана своего развития с допустимыми отклонениями по объёмам и временам выполнения задач, то обеспечение безопасности в этой системе сводится к минимизации внеплановых потерь при возникновении нештатных ситуаций и проведению мероприятий по их упреждению. Показано, что на практике, как критичность, так и безусловная уязвимость объектов ЕСГ, складываются из большого числа оценок по ресурсным критериям, важность которых заранее не известна и возникает задача многокритериального ранжирования.

В третьей главе автором сформулирована и решена проблема идентификации нештатных и чрезвычайных ситуаций, возникающих при функционировании ОКВИ путём выявления ключевых факторов, оказывающих негативное влияние на безопасное функционирование и устойчивое развитие ЕСГ. Если задано множество признаков текущей ситуации X (например, текущих значений индикаторов, характеризующих затраты на обеспечение производственной безопасности ОПО, индикаторы аварийных, нештатных и чрезвычайных ситуаций), множество допустимых реализаций ситуаций Y (например, штатная/нештатная ситуация или положительная/негативная динамика значений некоторого интегрального показателя безопасности и устойчивости функционирования), и существует целевая функция $y^* : X \rightarrow Y$, значения которой $y_i = y^*(x_i)$ известны только на конечном подмножестве объектов $\{x_1, \dots, x_l\} \subset X$ (например, соответствующие текущему значению интегрального показателя значения индикаторов, описывающих состояние ОПО), то решением проблемы идентификации нештатных и чрезвычайных ситуаций на обучающей выборке $X_l = (x_i, y_i)_{i=1}^l = 1$ (где пары «объект – ответ» (x_i, y_i) называют прецедентами) будет алгоритм, восстанавливающий зависимость y^* , то есть позволяющий построить решающую функцию $A : X \rightarrow Y$, которая приближала бы целевую функцию $y^*(x)$, причём не только на объектах обучающей выборки, но и на всём множестве X .

Показано, что достаточно трёх базовых аксиом, упомянутых ранее (наследования, согласия и отбрасывания) для того, чтобы адекватно описать структуру оптимальных решений задач выбора. Принятая аксиоматика показывает, что построенное решающее правило должно быть монотонной функцией относительно множества ситуаций, идентифицируемых как штатные. В итоге результирующий классификатор ситуаций монотонно превращается в произведение правил. Это важное свойство можно использовать, чтобы не переобучать классификатор при поступлении данных о новых ситуациях.

Автором показано, что для задания частичного порядка нужно количество признаков не менее чем $\lceil \log_2 N \rceil + 1$, где N - число ситуаций. Если вопросов меньше, обязательно будут присутствовать одинаковые описания хотя бы у пары ситуаций (согласно принципу Дирихле-Паули). Задача построения объяснения такого порядка – это типичная задача классификации дискретных объектов

– задача теории распознавания образов. На порядок влияет не количество, а качество признаков, даже скорее их сочетание, совместная реализация в описании ситуаций. Факты отсутствия необходимых сочетаний признаков являются дополнительными индикаторами для экспертов, сигнализирующими о необходимости более «тонких» и всесторонних проверок оцениваемых ситуаций. Критерием того, что решающее правило действительно удаётся построить, является общепринятое в математической логике правило: если большой массив данных объясняется существенно меньшим количеством переменных и по этим переменным информация группируется (кластеризуется), то эти переменные и следует рассматривать как ключевые факторы.

Общий вид решающего правила:

$$y = \sum_{v=1}^V x_{v,1} \cdot \dots \cdot x_{v,D_v}, \quad (26)$$

где y - оценка описания ($y = 1$ для принятых описаний – нештатных ситуаций, $y = 0$ для отвергнутых описаний – штатных); v - номер группы переменных; D_v - размерность (количество признаков в группе); $x_{v,1}$ - значение первого признака в группе; x_{v,D_v} - значение последнего признака в группе.

Для выявления признаков, которые необходимо учитывать в решающем правиле, автором разработан метод их анализа, использующий метрику Хемминга:

$$\rho(O_i, O_j) = \sum_{k=1}^K [O_{ik}(1 - O_{jk}) + (1 - O_{ik})O_{jk}]. \quad (27)$$

Величина этой метрики – расстояние между одноразмерными однотипными объектами (строками, столбцами) измеряется количеством несовпадающих у них пар. Единицу приплюсовывает выполнение условия «исключающее ИЛИ» (сложение по модулю 2). Несовпадение интерпретируется как ошибка, а близость объектов, тем самым, оценивается минимальным количеством «исправлений», которые надо внести либо в один, либо в другой, либо в оба объекта, чтобы объекты стали идентичными, неразличимыми. Естественно, выполняется равенство: $\rho(O_i, O_j) = \rho(O_j, O_i)$. Поскольку в задаче идентификации нештатных ситуаций на объектах ЕСГ можно ограничиться естественным классом монотонных функций, интересны не все несовпадения в паре, а только «упорядоченные». Автором предложено называть их мерой полу-Хемминга:

$$\mu(O_i, O_j) = \sum_{k=1}^K O_{ik}(1 - O_{jk}), \quad (28)$$

которая отражает только количество «удачных» признаков μ , для которых в описании первой из сравниваемых ситуаций значение «правильное» (равно 1), а у второй ситуации «ошибочное» (равно 0). По сочетаниям «удачных» признаков отделяются нештатные ситуации от штатных, а по метрике μ (28) уточняется размер «оранжевой» (переходной) зоны. Введённая мера полу-Хемминга позволяет устранить противоречивые пары ситуаций, которые заведомо не удовлетворяют условиям строгих неравенств, задающих частичный порядок. Первым шагом алгоритма решения задачи обработки описаний ситуаций является заполнение матрицы полу-Хемминга для всех пар ситуаций из имеющейся ретроспективной выборки. Это квадратная матрица с нулевыми диагональными эле-

Формально описание ситуации из N признаков – это упорядоченный набор из 0 и 1 (кортеж, вектор в N мерном пространстве, точка в N мерном двоичном кубе). В зависимости от формы представления – это либо формально факт наличия именно данного описания A_k означает, что

$$x_{k,1}^{\delta_{k,1}} \cdot x_{k,2}^{\delta_{k,2}} \cdot \dots \cdot x_{k,N}^{\delta_{k,N}} = y_k, \quad (29)$$

где символом $\delta_{k,j}$ обозначен позитивный или негативный ответ на j -й вопрос.

Все ретроспективные данные разделятся на два множества – объединение таких произведений: множество нештатных ситуаций, для которых $y_k = 1$ и множество штатных, для которых $y_k = 0$. Появляется общее эмпирическое свойство для всех описаний ситуаций.

Автором показано, что можно найти такие внутренние закономерности в описаниях ситуаций, которые понизят размерность задачи определения логики, чем нештатные ситуации отличаются от штатных или дадут дополнительные проверки взаимных соответствий (несоответствий) столбцов заполняемых описаний. Монотонность решающего правила обеспечивается использованием не всех логических функций, а только монотонных – при записи которых правила строятся только на данных признаков без использования их антагонистов. Как следствие, общий вид искомой зависимости, разделяющей штатные и нештатные ситуации, должен иметь вид $f = \text{ИЛИ} \prod_{j=1}^N (x_{k,j}^{Y_{v,j}}) = 1$ для нештатных ситуаций $(x_{k,j})$ и, соответственно, $f = \text{ИЛИ} \prod_{j=1}^N (x_{k,j}^{Y_{v,j}}) = 0$ - для штатных ситуаций $(x_{l,j})$.

Таким образом, автором разработаны научные основы анализа признаков, отражающих сущность и природу идентифицируемых ситуаций, возникающих при эксплуатации ОКВИ ЕСГ, с целью выявления внутренних связей между неочевидными наборами значений признаков об описаниях ситуаций и классифицирующими признаками, и обоснования критериев их классификации. Выполнен поиск скрытых закономерностей в логике описаний ситуаций с целью их использования для проверки внутренней непротиворечивости и целостности. Разработана схема автоматизации аудита описаний анализируемых ситуаций в виде ансамбля деревьев логических формул, истинных для ситуаций, признанных нештатными для ОКВИ ЕСГ и ложными для ситуаций, являющихся штатными. В качестве наиболее эффективного инструмента для автоматизации процессов анализа описаний ситуаций признан метод опорных векторов (МОВ), суть которого состоит в построении границы, разделяющей описания ситуаций, являющихся нештатными от штатных ситуаций.

Показано, что для того, чтобы идентификация, как процедура выявления нештатных ситуаций на ОКВИ ЕСГ, с последующим мониторингом их функционального состояния, дала ощутимый эффект, необходима не только автоматизация трудоёмких процедур документооборота, но и построение целостной системы интеллектуальной обработки данных, позволяющей облегчить процедуры экспертизы большого по количеству и многоаспектного по содержанию ин-

формационного материала. В целях повышения обоснованности и качества принимаемых ЛПР решений, была решена задача и разработаны подходы к построению системы интеллектуальной обработки данных идентификации нештатных ситуаций.

Автором разработана методика проверки на непротиворечивость информации, содержащейся в описаниях идентифицируемых ситуаций. Анализ признаков, отражающих сущность и природу ситуаций на ОКВИ ЕСГ позволил выявить внутренние связи между неочевидными наборами правильных значений признаков в описаниях и классифицирующими признаками, и обоснования критериев классификации.

В четвёртой главе приведены разработанные автором подходы к решению проблемы построения системы мониторинга за состоянием безопасного эффективного функционирования и устойчивого развития ЕСГ, включая вопросы интегральной оценки состояния производственной безопасности ОПО ЕСГ и ОКВИ ПАО «Газпром» в целом. Проведён фактографический анализ аварийности в ЕСГ, предложена классификация нештатных ситуаций по масштабам последствий. Методом «скользящего среднего» установлено, что статистика аварий в ЕСГ не является статистикой случайного блуждания, обнаружен волновой характер поведения скользящих квартальных оценок. Выполнено построение и проверка модулярного классификатора, позволяющего снять в прогнозах существенную долю неопределённости. Дано теоретическое обоснование волнового характера динамики значений наблюдаемых показателей аварийности с позиций моделей экономико-математического анализа научно-технического развития. Изложена авторская методика построения классификатора факторов аварийности дней, подробно описаны теоретические и алгоритмические особенности, реализованные в виде прикладной программы «паттерн-анализа аварийности» для ЭВМ.

Для построения системы прогнозирования, основанной на асимметриях распределений дат возникновения нештатных ситуаций, автором использован метод обнаружения скрытых закономерностей. Этот подход базируется на модулярной арифметике, в которой вычисления проводятся с остатками от деления на модули (целые числа, как правило, являющиеся простыми числами).

Отмечено, что проблема анализа объекта прогнозирования является отражением в прогностике более общей проблемы анализа систем. В случае исследования рядов исторических данных редких событий (нештатные ситуации) имеют место дискретные динамические вероятностные процессы. Поэтому целью анализа ЕСГ как объекта прогнозирования является разработка прогностической модели динамики нештатных ситуаций, позволяющей с помощью экспериментов с ней уменьшать степень неопределённости дат событий и их масштаба, получать прогнозную информацию об объекте прогнозирования за счет выявления скрытых закономерностей.

Скрытые закономерности указывают либо на изменения состояния ЕСГ, либо на закономерности изменений параметров внешней среды, существенно

влияющей на её функционирование (законы изменчивости «прогнозного фона»). В качестве обучающей выборки в работе исследована статистика нештатных ситуаций в ЕСГ за восемь лет (1998-2005 гг.) – Рис. 6.

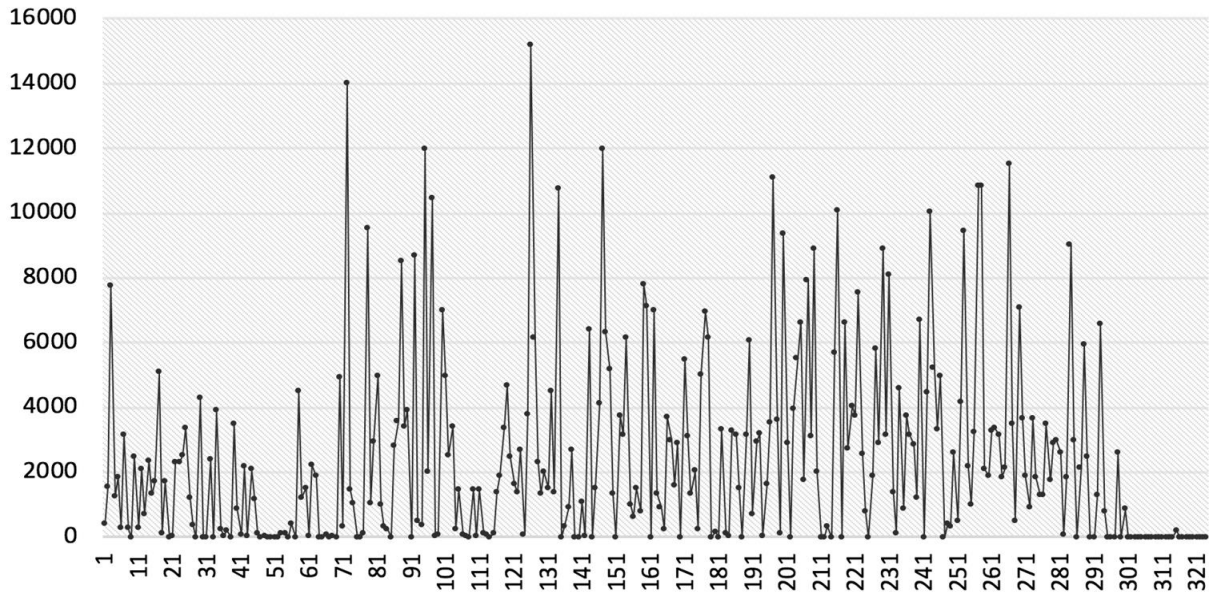


Рисунок 6. Обучающая выборка. Потери газа (тыс. куб. м)

Автором показано, что даты возникновения аварий не являются реализацией блуждания случайной бернуллиевской величины (Рис. 7).

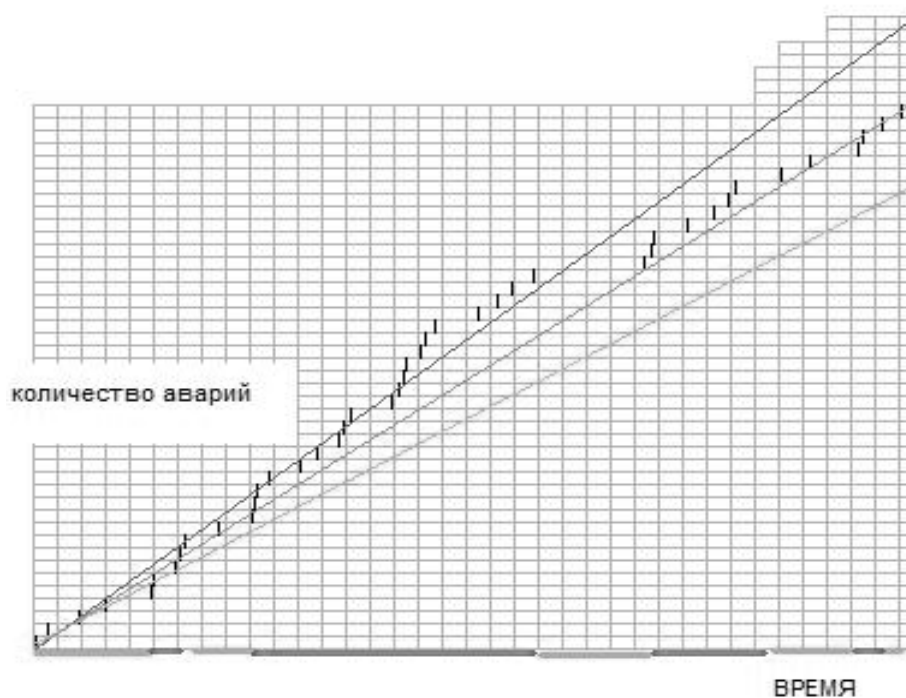


Рисунок 7. График динамики дат аварий в ЕСГ за 1998 год

На Рис. 7 также видно, что в динамике дат аварий имеются две достаточно длительные фазы повышенной интенсивности возникновения нештатных ситуаций, а динамика аварийности носит явный колебательный сезонный характер, поэтому прогноз предложено строить на принципах хорошо известных в теориях моделирования и подобию. Устойчивыми модельными конструкциями для целей прогнозирования являются обнаруженные константы (они же циклы с бесконечным периодом) и ряд самоподобных структур. Для поиска таких устойчивых структур автором выполнена большая по объему предварительная обработка статистических данных из обучающей выборки.

Обнаруженный волновой характер динамики дат аварийных ситуаций говорит в пользу применения для прогноза классических экстраполирующих «колебательных» функций. В качестве инструмента может быть применён классический аппарат цифровой обработки сигналов – спектрального анализа данных, но при этом также возникают специфические трудности обнаружения закономерностей. Главная из них – преобладание дней, в которых аварий нет. Методы спектрального анализа адекватны для обобщенных интервалов времени, например, для предсказания количества аварийных дней в очередной «пачке» нештатных ситуаций, но для проверки этого утверждения необходимы дополнительные вычислительные эксперименты.

В ходе фактографического исследования было обнаружено, что в различные дни недели случается различное количество аварий с различной степенью тяжести. «Трудовой, технологический» цикл в 7 дней – естественен. Также выяснилось, что более чётко обозначен 28-дневный цикл. По данным о 255 датах в обучающей выборке проявилась асимметрия следующего рода: имеют место четыре различных понедельника, четыре различных вторника. В 28-дневном цикле в 8 дней на протяжении 8 летней истории не было аварий с большими ущербами. В итоге построено семь различных «грубых» классификаторов для различных дней недели.

С помощью модулярной арифметики и принципа «разумной достаточности» было проанализировано наличие других циклов, и сделан выбор в пользу двух естественных природных циклов: годового в 37 дней (37 – ближайшее простое число к десятой доле продолжительности среднего года). При построении классификатора «лунный» цикл также был округлен до 29,5 дней. Пара периодов этого цикла (59 дней) – также простой модуль. В результате полная циклограмма классификатора составляла $28 \times 29,5 \times 37$ дней, что соответствует приблизительно 84 годам.

Учитывая, что достоверность данных в обучающей выборке крайне низка, при построении классификатора были принят ряд упрощений.

Во-первых, использован байесов подход.

Во-вторых, проведена модуляция фаз, в результате которой время внутри циклов было сжато около значений фаз, при которых наблюдались ранее аварии с большими ущербами.

Одновременно время было «растянуто» в «спокойных» фазах, в которых нештатные ситуации с тяжелыми последствиями не наблюдались. При модуляции фаз использовался изобретенный Н. Н. Жигиревым метод классификации, учитывающий асимметрию частотных свойств информационных признаков¹.

В-третьих, промодулированные фазы циклов были равномерно разбиты на 3, 9, 27 частей, и осуществлен выбор при сравнительном анализе разбиений в пользу разбиения на 9 частей.

В результате каждый из семи классификаторов представляет из себя матрицу размерности 9 x 9. Каждый день из 3-х тестирующих лет попадает на вход одного из семи классификаторов. Далее по тому, в каких промодулированных фазах находится прогнозный фон, в этот день выбирается соответствующая клетка матрицы, и дню «назначается» в прогнозе «по подобию» (по аналогии) точно такое же распределение нештатных ситуаций, что и в ретроспективных данных этой клетки.

Задача прогнозирования разбита автором на подзадачи трёх уровней:

1) макро-прогнозирование – предсказание основных тенденций изменения индикаторов аварийности с учетом влияния результатов научно-технических достижений в области безопасности и функционирования ЕСГ и определение размеров и границ «коридоров» изменения базовых индикаторов (Рис. 8);

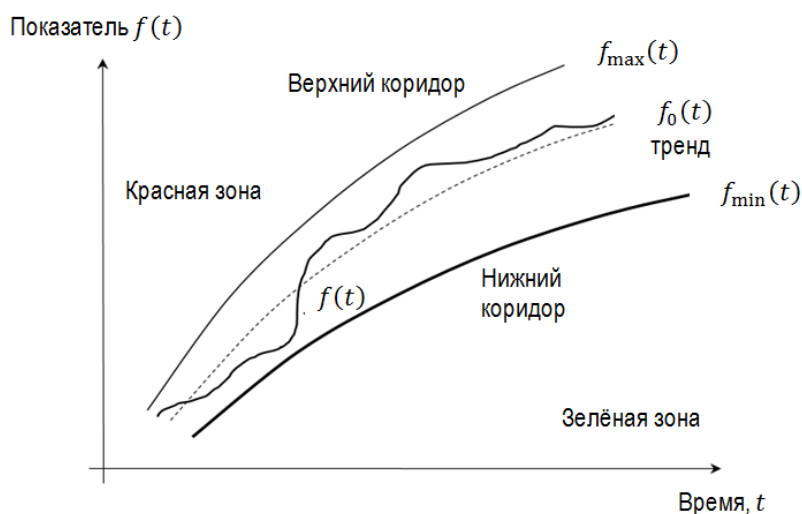


Рисунок 8. Иллюстрация задачи макро-прогнозирования

2) мезо-прогнозирование – исследование сезонных и других колебаний в динамике аварийности в пределах «естественных» коридоров (Рис. 9);

¹ Жигирев Н.Н., Корж В.В. Автоматизированная система классификации текстов. Сборник научных трудов. В 11 частях. Ч. 9. — М.: МИФИ, 1998. - С. 99-103.

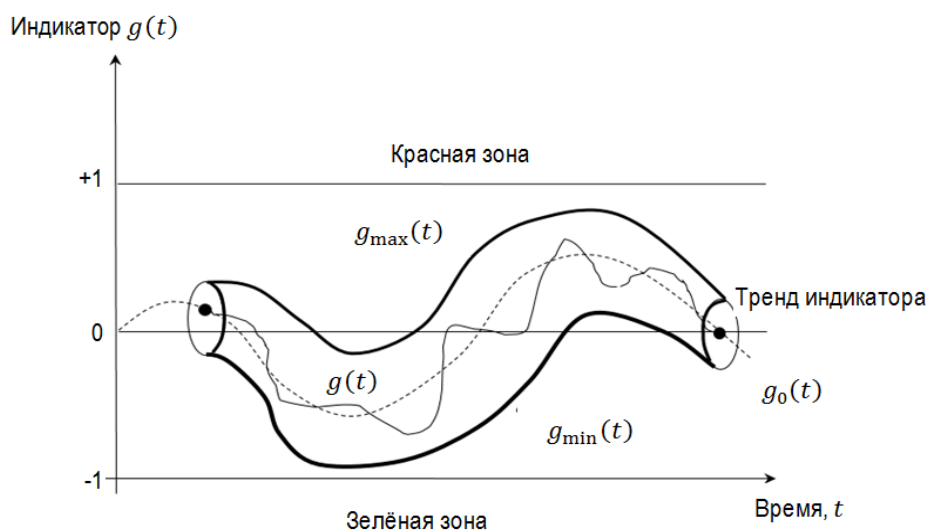


Рисунок 9. Иллюстрация поиска закономерностей в поправке прогноза тренда

3) микро-прогнозирование – предсказание конкретных дат и границ интервалов областей «ожидаемой повышенной аварийности».

Показано, что динамика аварийности носит к тому же нестационарный и сезонный характер. Кроме того, аварийность на ЕСГ не является абсолютно случайной. Для различных фаз «естественных» циклов, различных дней рабочей недели, разных месяцев, а также различающихся дней в месяце статистики аварийности значительно отличаются. Это означает, что есть основания для поиска комбинаций факторов, при которых аварийность повышена («негативные паттерны»).

Автором показано, что факторы, в которых наблюдаются различия, имеют как циклическую, так и нециклическую природу. Совместный учет всех факторов возможен при построении развивающейся экспертной системы, учитывающей в том числе экономические показатели изучаемых объектов ЕСГ. Предложена оригинальная разметка данных, в результате которой все ретроспективные и перспективные данные приобретают уникальную тройку значений, которая повторяется спустя 15 281 день. В главе представлены результаты анализа изменения структуры аварийности в ЕСГ, в виде долей накопленных количеств аварийных дней соответствующего типа – разбиение аварийных дней на 5 уровней по двум шкалам (Табл. 1 и Табл. 2).

Таблица 1. Классификатор учетных дней по размеру ущерба

| Класс УД по размеру ущерба | Диапазон ущерба, тыс. руб. |
|-------------------------------------|----------------------------|
| Сверхбольшие ежедневные ущербы (XU) | Свыше 18000 |
| Большие ежедневные ущербы (LU) | 5000-18000 |
| Средние ежедневные ущербы (MU) | 900-5000 |
| Малые ежедневные ущербы (SU) | 0-900 |
| Отсутствие аварии (OU) | 0 |

Таблица 2. Классификатор учетных дней по размеру потерь газа

| Класс УД по размеру потерь газа | Диапазон потерь газа, тыс. куб. м |
|--|-----------------------------------|
| Сверхбольшие ежедневные потери газа (XP) | Свыше 9200 |
| Большие ежедневные потери газа (LP) | 4600-9200 |
| Средние ежедневные потери газа (MP) | 1000-4600 |
| Малые ежедневные потери газа (SP) | Ниже 1000 |
| Отсутствие аварии (OP) | 0 |

Результаты анализа показывают, что суммарный баланс аварийности смещается со временем в сторону аварий с большими (*LU*) и сверхбольшими (*XU*) ущербами.

При этом доля аварийности типа (*XU*) увеличивается пропорционально волнообразно на 0,3% в год, а доля аварий типа (*LU*) – на 1,8% в год. Суммарно рост аварий этих типов составляет в среднем 2,1% в год. Следует отметить, что вымывание аварий типа (*SU*) и рост долей аварий типов (*LU*) и (*XU*) может быть связан с инфляционным удорожанием объектов ЕСГ, и, следовательно, со стоимостным «завышением» потерь и ущербов при разрушении объектов. При этом рост внепланового ущерба коррелирует с ростом доли потерей газа (при градации аварий по ущербам).

Анализ обучающей выборки показывает, что доля потерей газа при авариях типа (*LU + XU*) также выросла с 19% (2005г) до 39%. Как следствие: при построении АСС необходимо учитывать плавное смещение границ разделения классов по типам ущербов, что позволит более адекватно оценивать тенденции роста ущербов при авариях различных типов – что необходимо для систем страхования внеплановых ущербов и потерь газа.

На Рис. 10-12 приведены сравнительные графики прогноза в соответствии с предложенной методикой (обучающая выборка 1998-2005 годы) и тестирующая выборка (2006-2008 годы). Жирной линией изображена динамика исторических данных, тонкой – сглаженная динамика прогноза.

Видно совпадение прогностических и реальных динамик с точностью до ширины коридора в 2-3 аварии. Расхождение может быть уменьшено, если использовать учёт сезонной интенсивности работы ЕСГ (в паттерны должны быть включены новые координаты – тип сезона или же изменен пересчет значений в зависимости от прогноза сезонных изменений в колебаниях интенсивности появления аварийных дней из моделей мезо-масштаба). Точность коэффициентов пересчёта может быть также повышена, если учесть асимметрию в распределениях, учитывающих так называемые нециклические факторы. Сделан вывод – «обычную» аварийность и аварийность крупных аварий надо исследовать с системных информационных позиций, в частности, нельзя никоим образом объединять статистику в единые статистические показатели без предварительного доказательства того, что такое смешивание корректно. Показано, что практически по всем факторам «прогнозного фона» статистика крупных и мелких аварий различна. Различия в статистике целесообразно использовать для уточнения прогнозных оценок масштабов аварий.

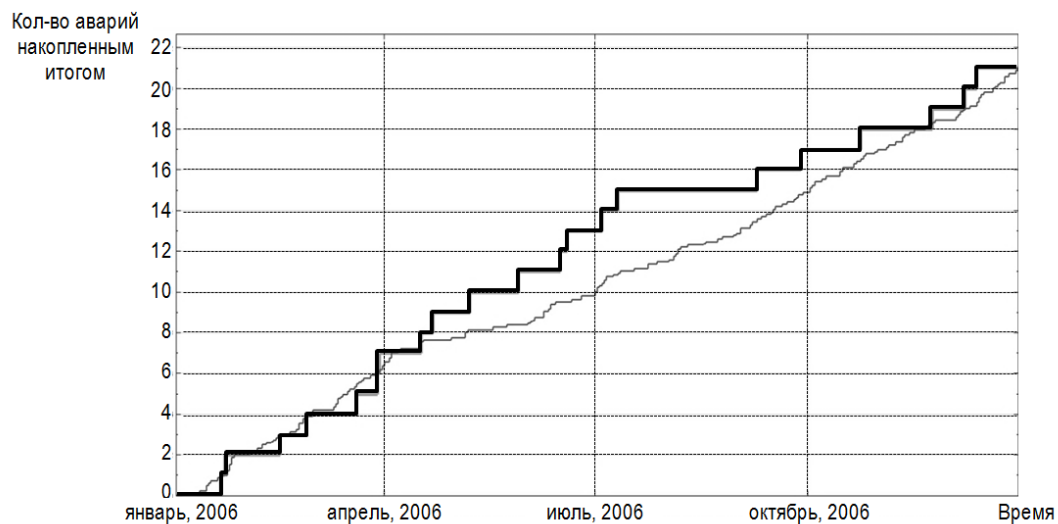


Рисунок 10. Динамика аварийности за 2006 год

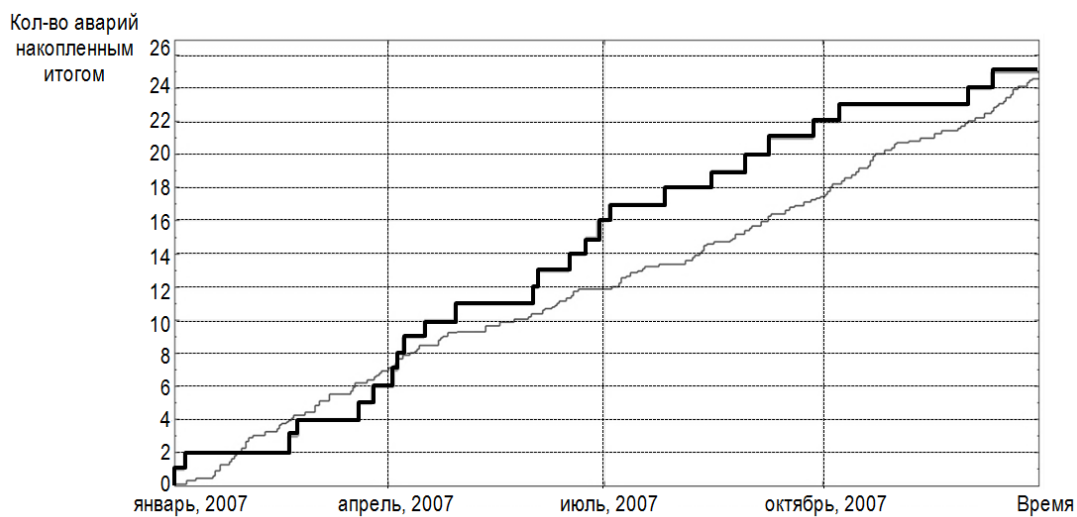


Рисунок 11. Динамика аварийности за 2007 год

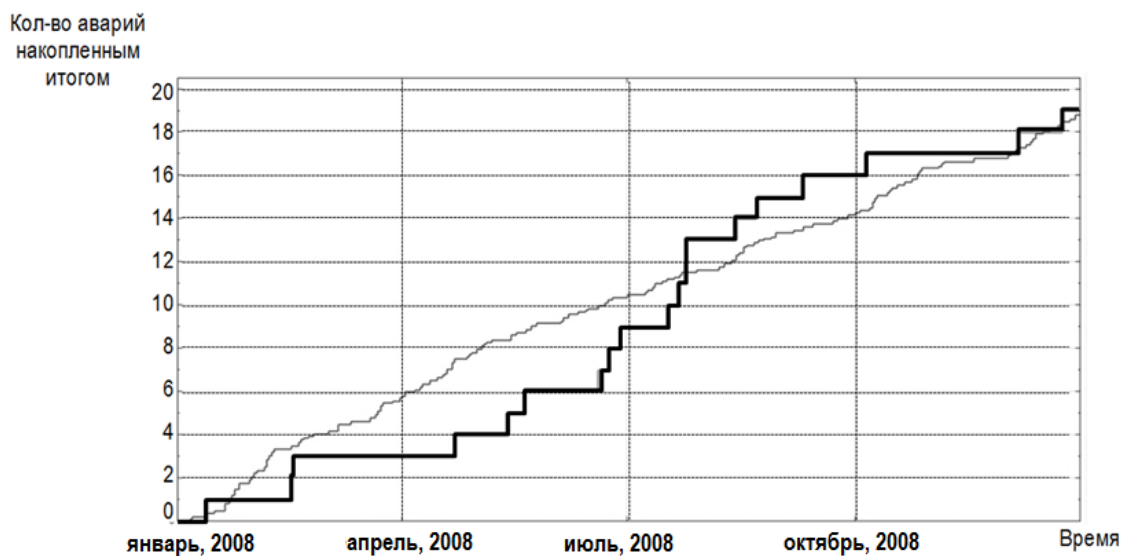


Рисунок 12. Динамика аварийности за 2008 год

Результаты тестирования самого первого классификатора (из 33 правил) на самом же массиве данных из обучающей выборки представлены в приложениях к диссертации. На основе анализа исходных данных сформулирован системный подход к решению задач прогнозирования на основе комплексного использования моделей прогноза различного временного масштаба. Проанализированы особенности процедуры предсказания конкретных дат, в которые наиболее вероятно возникновение нештатных ситуаций (Рис. 13).

| Январь | | | | | | | Февраль | | | | | | | Март | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|-----|---------|----|----|----|----|----|----|------|----|-----|-----|----|----|----|
| Вс | Пн | Вт | Ср | Чт | Пт | Сб | Вс | Пн | Вт | Ср | Чт | Пт | Сб | Вс | Пн | Вт | Ср | Чт | Пт | Сб |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 4 | 5 | 6 | 7* | 8 | 9 | 10 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 8 | 9 | 10* | 11* | 12 | 13 | 14 |
| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17* | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
| 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | | | | | | | | 29 | 30 | 31 | | | | |

| Апрель | | | | | | | Май | | | | | | | Июнь | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|------|----|----|----|----|----|----|
| Вс | Пн | Вт | Ср | Чт | Пт | Сб | Вс | Пн | Вт | Ср | Чт | Пт | Сб | Вс | Пн | Вт | Ср | Чт | Пт | Сб |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | 1 | 2 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
| 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | | | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 28 | 29 | 30 | | | | |
| | | | | | | | 31 | | | | | | | | | | | | | |

| Июль | | | | | | | Август | | | | | | | Сентябрь | | | | | | |
|------|----|----|----|----|----|----|--------|----|----|----|----|----|----|----------|----|----|----|----|----|----|
| Вс | Пн | Вт | Ср | Чт | Пт | Сб | Вс | Пн | Вт | Ср | Чт | Пт | Сб | Вс | Пн | Вт | Ср | Чт | Пт | Сб |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | 1 | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 27 | 28 | 29 | 30 | | | |
| | | | | | | | 30 | 31 | | | | | | | | | | | | |

| Октябрь | | | | | | | Ноябрь | | | | | | | Декабрь | | | | | | |
|---------|----|----|----|----|----|----|--------|----|----|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|----|----|
| Вс | Пн | Вт | Ср | Чт | Пт | Сб | Вс | Пн | Вт | Ср | Чт | Пт | Сб | Вс | Пн | Вт | Ср | Чт | Пт | Сб |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 29 | 30 | | | | | | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Рисунок 13. Пример посуточного прогноза паттернов аварийности

Возможность построения экспертной системы правил, уточняющей масштабы событий в зависимости от сезона, дня рабочей недели и других факторов продемонстрирована в виде продукционной системы – типовой для классических экспертных систем.

Приведены количества ошибок 1-го и 2-го рода. Для массива ретроспективных данных ошибки оценок масштаба событий составляет 15%. И хотя дерево разбора случаев детерминированное, оценки являются вероятностными, так как каждое правило из-за заложенных в классификацию ошибок определяет взвешенную смесь аварий различного уровня тяжести. Методом «скользящего среднего» установлен факт, что статистика аварий не является статистикой случайного блуждания. Получено распределение ожидаемого времени между авариями.

В пятой главе приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований (программно-методические разработки, результаты верификации, моделирования, экспериментального обоснования разработанных методов и алгоритмов), по обоснованию возможности построения интегрального показателя безопасности ОКВИ ЕСГ. Изложены теоретические основания и описание разработанного, на основе использования математической теории оптимального управления и применения метода опорных векторов, инструмента и алгоритмов «траекторного группового анализа» динамики изменения ключевых показателей, характеризующих состояние промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО), относительно некоторого заданного целевого значения.

На основе выполненного анализа автором сделан вывод о том, что в вопросах обеспечения безопасности следует отказаться от принципа удержания на какой-то одной «оптимальной» траектории и принять за основу принцип удержания траектории в пределах оптимального коридора. И у «лидеров», и у «отстающих» должны быть при этом созданы стимулирующие условия к их росту. Постулируется, что в «оптимуме» динамического поведения (которому соответствуют объекты со средним показателем) на самом деле это «недозагруженные» объекты, имеющие резерв. Обычно групповое поведение элементов в системе описывается вероятностной функцией распределения $P(x_1, \dots, x_n)$, которая связана с полем сил, задаваемых потенциальной функцией $V(x_1, \dots, x_n; c_1, \dots, c_k)$ посредством уравнения Фоккера-Планка:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla \cdot (P \cdot \nabla V) + \nabla^2 (D \cdot P). \quad (30)$$

Автором сформулированы ряд положений, которые необходимо учитывать при использовании уравнения (30). Например, внешнее поле, дающее финансы для того, чтобы существовали и выполняли свои обязательства дочерние общества, эксплуатирующие ОПО ЕСГ, создает частично или полностью сам ПАО «Газпром» своими заказами и своей политикой в области обеспечения безопасности. Диффузия появляется тогда, когда финансируется работа, но выделенные средства не являются оптимальными – излишки могут тратиться эксплуатирующими организациями на «затыкания дыр» по другим проектам. И,

напротив, что редко встречается, «исполнитель работ» изыскивает сам дополнительные ресурсы, чтобы хорошо выполнить требования ПАО «Газпром» и государства, так как ему важен стабильный заказчик.

Для иллюстрации работоспособности метода в работе приведено описание построения модели динамического коридора, построенной при анализе данных ограниченной выборки из контрагентов, прошедших (непрошедших) предквалификацию на торговой площадке ПАО «Газпром» по направлению «проектно-исследовательские работы» (ПИР). Это оправдано с точки зрения обеспечения безопасного функционирования ЕСГ и Группы Газпром в целом, поскольку эта процедура является крайне важной составляющей задачи обеспечения комплексной безопасности компании. От качества выполнения работ контрагентами безопасность производственных объектов (как проектируемых, так и функционирующих в штатном режиме) и устойчивое развитие компании зависят напрямую. Интенсивность выработки на одного человека задана функцией времени $y(t)$. Тогда за любой период времени $[t_1, t_2]$ объём выработки на одного человека составит сумму $-\int_{t_1}^{t_2} y(t)dt$. На начальном этапе при отсутствии полноформатной системы мониторинга за основу предложено взять три измерения – значения интегралов: I_0 - объём выработки (ожидаемый, заявленный, подкрепленный договорами, но не фактический) на одного человека за текущий год; I_{-1} - объём выработки на одного человека за предыдущий год (фактический, задокументированный актами сдачи-приемки работ) и I_{-2} - объём выработки на одного человека два года назад (от текущего). При выводе общих характеристик в первую очередь интересны групповые индикаторы, а потом уже относительное положение значений каждого индивидуального объекта по отношению к групповому индикатору.

Введено два подобных индикатора. Первый (q_a) – фактор относительного ускорения, вычисляемый как отношение суммы выработок I_0 и I_{-2} к выработке I_{-1} . Выработка I_{-1} выбрана по причине того, что это самая ближайшая из оценок, подтверждённая фактами выполнения работ

$$q_a = \frac{I_0}{I_{-1}} + \frac{I_{-2}}{I_{-1}} = \frac{a}{I_{-1}} + 2. \quad (31)$$

Из (31) видно, что q_a - измеритель «провала» в выработке в предыдущий (I_{-1}) ($q_a \gg 2$) или текущий (I_0) ($q_a \ll 2$) годы. То есть косвенно q_a - фактор оценки нестабильности тренда (при больших отклонениях от 2) и, наоборот, показатель устойчивости тренда для значений q_a , близких к 2. Априорно можно считать, что нестабильность q_a и понижающий тренд «подозрительны», так как связаны с реорганизацией контрагента и требуется «выяснить»: является ли контрагент в новом своем состоянии преемником квалификационного и других потенциалов своего предшественника. К тому же, устойчивое «падение» ($q_a \cong 2$) при отрицательном тренде – это не то, что нужно для развития, важно знать значение еще и второго фактора.

Второй индикатор (q_v) – показывает относительную скорость роста производительности эксплуатирующей организации за последние два года:

$$q_v = \frac{I_0}{I_{-1}} = \frac{v}{I_{-1}} + 1. \quad (32)$$

Индикатор (32) естественно коррелирует с (31), являясь его частью. Его адекватность несколько слабее, так как величина (I_0) на момент выделения финансирования (особенно если это происходит в начале года) имеет для одних эксплуатирующих организаций (со стабильно переходящими работами) «нормальные» диапазоны погрешностей, для других же оценка (I_0) - лишь заявленные объёмы обязательств, которые потребуют для выполнения наличия дополнительных условий (например, аутсорсинга). Для визуализации изменения возможного значения факторов в зависимости от процесса финансирования, полезно перейти (через аффинные преобразования) от индикаторов q_a и q_v к паре связанных с ними нормированных индикаторов – F_a и F_{va} , которые задают геометрический образ, удобный для анализа – «мишень».

Фактор F_a получается простой нормировкой q_a

$$F_a = \frac{q_a - c_a}{L_a}, \quad (-1 \leq F_a \leq 1), \quad (33)$$

где c_a - центр мишени по оси абсцисс, а L_a - размер половины стороны квадрата сечения.

Нормированный фактор F_{va} - линейная комбинация факторов ускорения q_a и скорости q_v :

$$F_{va} = \frac{q_a - c_a - \mu \times (q_v - c_v)}{L_{va}}, \quad (-1 \leq F_{va} \leq 1). \quad (34)$$

Эффект от того, что скорость растёт с ростом ускорения учитывается тем, что эта «добавка» вычитается с коэффициентом $\mu > 0$, который определяется, как и константы c_a, c_v, L_a, L_{va} , на основе анализа групповых данных. Геометрически положение квадратной мишени ($F_a \times F_{va}$) размером $[-1, +1] \times [-1, +1]$ на плоскости факторов q_a (абсцисса) и q_v (ордината) отобразится как параллелограмм ABCD (Рис. 14).

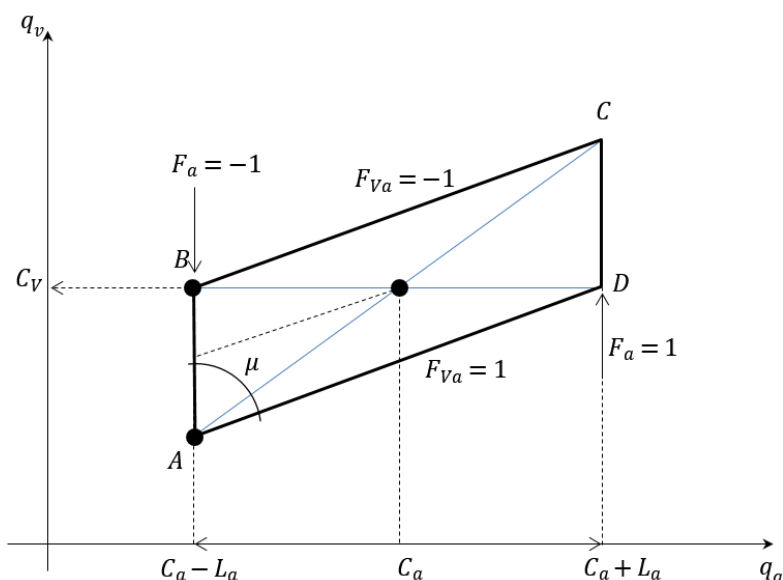


Рисунок 14. Внешний вид и параметры мишени

Из-за того, что преобразования аффинные, очевидно, что центру мишени с координатами $(c_a; c_v)$ – точке пересечения диагоналей соответствует центр квадратной мишени с координатами $\{F_a = 0; F_{va} = 0\}$. Величина коэффициента $\mu > 0$ равна тангенсу угла наклона стороны (DA) к оси ординат.

По данным группового анализа размеры и наклон мишени были определены с помощью модифицированного метода опорных векторов.

Справедливы соотношения

$$\begin{cases} F_a = \frac{I_0 + I_{-2} - c_a}{I_{-1} + I_{-1} - c_a} L_a; \\ F_{va} = \frac{F_a \times L_a - \mu \times (I_0 - c_a)}{L_{va}}. \end{cases} \quad (35)$$

При $\mu > 1$ минимум расстояния траектории $\langle F_a(q_a); F_{va}(F(q_a)) \rangle$ достигается в точке, которая в нормированных координатах касается угла концентрического квадрата с центром $(0; 0)$ независимо от того, пересекает ли траектория мишень «выше» центра или «ниже» центра, или вообще не пересекает мишень. В этих точках $F_a^* = F_{va}^*$, откуда следует, что

$$\begin{aligned} F_a^* = F_{va}^* &= \frac{B_1}{A} + \frac{B_2}{A} \times \frac{I_{-2}}{I_{-1}}; \\ A &= 1 - \frac{(1-\mu)L_a}{L_{va}} > 0; \\ B_2 &= \frac{\mu}{L_{va}} > 0; \\ B_1 &= B_2 \times (c_v - c_a) < 0. \end{aligned} \quad (36)$$

При $|F_a^*| \leq 1$ - траектория пересекает мишень, при $|F_a^*| > 1$ - проходит мимо неё на расстоянии $|F_a^*| - 1$. Поскольку F_a^* зависит от величины I_0 , естественно определить оптимум I_0^* . Его значение вычисляется как линейная комбинация предыдущих достигнутых результатов:

$$I_0^* = K_{-1}I_{-1} + K_{-2}I_{-2}, \quad (37)$$

где

$$K_{-1} = \frac{B_1 L_a}{A}, K_{-2} = \frac{B_2 L_a}{A} - 1. \quad (38)$$

Для полученного разностного уравнения характеристическое уравнение имеет вид:

$$\lambda^2 - K_{-1}\lambda - K_{-2} = 0. \quad (39)$$

Откуда

$$\lambda_{1,2} = \frac{K_{-1}}{2} \pm \sqrt{\frac{K_{-1}^2}{4} + K_{-2}}. \quad (40)$$

Для рассматриваемого примера предквалификации контрагентов первое собственное значение $\lambda_1 = 1,1315 > 1$ соответствует росту системы в броуновском режиме (достигнутые успехи инициируют большее доверие при торгах), а вот $\lambda_2 = -0,2723 < 0$ - показывает скорость «забывания заслуг», если они не подтверждаются результатом. При этом в силу отрицательности λ_2 , компонента решения описывает затухающие колебания. Общий вид феноменологического решения – сумма двух геометрических прогрессий (в отличие от броуновского

движения)

$$I_t = c_{-1}(\lambda_1)^t + c_{-2}(\lambda_2)^t, \quad (41)$$

где константы c_{-1} и c_{-2} определяются из начальных условий

$$\begin{cases} I_{-1} = c_{-1}(\lambda_1)^{-1} + c_{-2}(\lambda_2)^{-1}; \\ I_{-2} = c_{-1}(\lambda_1)^{-2} + c_{-2}(\lambda_2)^{-2}. \end{cases} \quad (42)$$

F_a^* меняет свой знак, когда траектория проходит через центр мишени. При $F_a^* = 0$ выполняется оптимальное соотношение объемов выполненных работ в предыдущие года – показатель Θ^* .

$$\Theta^* = \frac{I_{-2}}{I_{-1}} = \frac{|B_1|}{|B_2|} = |c_{va} - c_a|. \quad (43)$$

Так, в случае предквалификации контрагентов $\Theta^* = 0,9079$ оптимально, чтобы нарастание объёмов выработки (в среднем) должно составлять - 10%: $[\Theta^*]^{-1} = 1,1014$. Отметим, что $[\Theta^*]^{-1} < \lambda_1$, что косвенно подтверждает «правильность» выбранного подхода – оптимально было бы 10%, но 13% лучше, поскольку часть «заслуг» неизбежно забудется. Зная «эталонную» траекторию, проходящую через центр мишени, можно оценить в процентном отношении уровень «предельной неоптимальности» траекторий эксплуатирующих организаций ψ в виде перегрузки или недогрузки до эталона, если бы им в текущем году дали возможность реализовать «оптимальный сценарий загрузки»

$$\psi = \frac{I_0 - I_0^*}{I_0^*}. \quad (44)$$

Описанная модель «мишени» рассматривает траектории показателей объектов без учёта «диффузионных» составляющих. Поэтому она – базовый элемент для наращивания совокупностей и индикаторов для будущей разветвленной системы мониторинга.

Таким образом, автором показано, что развитие предлагаемого метода анализа и управления ситуациями по прецедентам может стать основой разработки интегрального показателя состояния производственной безопасности на ОКВИ ЕСГ и элементом системы мониторинга и раннего предупреждения нештатных ситуаций в рамках риск-ориентированного подхода. В общем случае этот подход охватывает как вероятностные методы моделирования аварийных процессов и событий, так и детерминистские методы. Контроль объекта мониторинга при внедрении системы дистанционного контроля (надзора) должен быть организован таким образом, чтобы можно было вовремя провести управленческие решения, если состояние объекта приближается к опасной зоне.

В шестой главе приведены практические примеры использования описанных в предшествующих главах методов и алгоритмов, в частности, рассмотрена задача построения единого ранжированного по их системной значимости перечня объектов критически важной инфраструктуры ЕСГ, задача оценки контрагентов ПАО «Газпром», принимающих участие в закупочной деятельности с точки зрения риска невыполнения ими принятых на себя обязательств, задача построения области допустимых значений интегрального показателя безопасности состояния предквалифицируемых контрагентов и алгоритм оценки устойчивости полученного решения. Рассмотренные примеры практического

применения разработанных методов и алгоритмов анализа и оценки рисков безопасного функционирования и устойчивого развития ЕСГ демонстрируют высокий уровень адаптивности и универсальность разработанных методических подходов и вычислительных алгоритмов для решения широкого спектра задач обеспечения безопасности ПАО «Газпром».

Результаты работы использованы при подготовке локальных нормативных актов, документов системы стандартизации и программно-алгоритмического обеспечения ПАО «Газпром», в частности разработаны:

- Стратегия развития системы управления производственной безопасностью ПАО «Газпром» на период до 2020 года;
- Стратегия развития ООО «Газпром газнадзор» на 2018-2022 годы;
- Концепция развития системы защиты объектов группы Газпром с использованием инженерно-технических средств охраны на период до 2015 года;
- Комплексная целевая программа по совершенствованию охраны объектов ОАО «Газпром» с использованием комплексов инженерно-технических средств охраны и система антитеррористической защиты на 2008-2010 годы;
- Комплексная целевая программа на 2011-2015 годы по совершенствованию системы обеспечения безопасности объектов ОАО «Газпром»;
- Комплексная целевая программа на 2016–2022 годы по совершенствованию системы безопасности объектов ОАО «Газпром»;
- СТО Газпром 2-1.4-262-2008 Объекты ОАО «Газпром», подлежащие охране в целях защиты от террористических проявлений. Классификация;
- СТО Газпром 4.1-3-004-2014 Методика оценки ущербов от внешних противоправных воздействий на объекты морского и шельфового базирования;
- Р Газпром 4.0-0-001-2014 Система обеспечения комплексной безопасности ОАО «Газпром». Методика оценки экономической эффективности от внедрения комплексных систем безопасности на объектах ОАО «Газпром»;
- СТО Газпром 13-001-2015 Комплекс стандартов ОАО «Газпром» в области ситуационного управления. Основные положения;
- Программа для ЭВМ «Ранжирование объектов ОАО «Газпром» по их системной значимости» (№ гос. Регистрации 2013 660 578 от 11.11.2013 г. п/п № 45471 от 05.09.2013 г.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Автором решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение: разработана и внедрена наукоёмкая методология стратегического планирования и рационального распределения ресурсов для обеспечения безопасного функционирования и устойчивого развития ОКВИ ЕСГ. Показано, что основой современных систем мониторинга угроз и рисков безопасности должна стать концепция управления рисками, суть которой заключается в формировании механизмов, методов и инструментов, с помощью которых возможно не только выполнить оценку существующих для исследуемой системы рисков и угроз, но и прогнозировать их появление и развитие в будущем.

2. Показано, что разработку и внедрение подсистемы прогноза состояния безопасности ОКВИ, основанной на расчёте количественных и качественных показателей рисков и индикаторов угроз, целесообразно проводить с применением методологии так называемых систем раннего оповещения. Особое внимание при этом необходимо уделять влиянию факторов риска на систему сбалансированных показателей безопасности и рисков, поскольку прогнозирование по единичным показателям не даёт целостной картины тенденций развития и состояния системы. Риск в области безопасности и устойчивости ЕСГ следует рассматривать как многокомпонентный вектор, набор параметров которого может меняться. Реальная оценка уровня безопасности на основе использования риск-ориентированного подхода невозможна без достаточно информативной базы относительно количественных и качественных характеристик факторов рисков и, с другой стороны, данных о состоянии объектов и технологического процессов на них, которые испытывают влияние этих факторов риска без развития полноформатной системы мониторинга.

3. Показано, что контроль объекта мониторинга должен быть организован таким образом, чтобы можно было вовремя провести управленческие решения, если состояние объекта приближается к опасной зоне. Данная задача распадается на ряд подзадач, так как в вертикально интегрированных компаниях есть, как правило, несколько центров принятия решений на разных уровнях управления. Перспективными могут оказаться методы оценки надёжности достижения целевых показателей и методы группового анализа (последние более предпочтительны, так как позволяют строить траектории изменения показателей без учёта «диффузионных» составляющих и, как следствие, могут служить базовым элементом для наращивания совокупностей, показателей и индикаторов в будущей разветвленной системе мониторинга).

4. Разработаны научные основы ранжирования ОКВИ ЕСГ по показателю их системной значимости. Показано, что в случае, если под устойчивостью функционирования ЕСГ понимать выполнение ею плана своего развития с допустимыми отклонениями по объёмам и временам выполнения задач, то управление безопасностью в этой системе сводится к минимизации внеплановых потерь при возникновении нештатных ситуаций и проведению мероприятий по их

упреждению. Показано, что на практике, как критичность, так и безусловная уязвимость объектов ЕСГ (в задаче их ранжирования по системной значимости), складываются из большого числа оценок по ресурсным критериям, важность которых заранее не известна, то есть возникает задача многокритериального ранжирования.

5. Разработан и исследован на устойчивость и непротиворечивость алгоритм, позволяющий выравнивать шкалы системной значимости объектов разных типов, то есть встраивать в единую шкалу объекты, описываемые различными ресурсными критериями.

6. Разработаны научные основы анализа признаков, отражающих сущность и природу идентифицируемых ситуаций, возникающих при эксплуатации ОКВИ ЕСГ с целью выявления внутренних связей между неочевидными наборами правильных значений признаков об описаниях ситуаций и классифицирующими признаками и обоснования критериев их классификации.

7. Разработана схема автоматизации аудита описаний анализируемых ситуаций в виде ансамбля деревьев логических формул, истинных для ситуаций, признанных штатными для ОКВИ ЕСГ и ложными для ситуаций, являющихся штатными. В качестве наиболее эффективного инструмента для автоматизации процессов анализа описаний ситуаций выбран метод опорных векторов, суть которого состоит в построении границы, разделяющей описания ситуаций, являющихся штатными от штатных ситуаций.

8. Изложена авторская методика проверки на непротиворечивость информации, содержащейся в описаниях идентифицируемых ситуаций. Выполнен поиск скрытых закономерностей в логике описаний и составе признаков с целью их использования для проверки внутренней непротиворечивости и целостности описаний на основе анализа ретроспективного опыта принятия решений по классификации подобных ситуаций в прошлом.

9. Показано, что необходимо различать информационно-управляющие и экспертные системы. Последние не подразумевают прямого включения в контуры управления, поскольку их включение может стать причиной «роботизации» процесса принятия решений из стандартного набора сценариев поведения в штатных и чрезвычайных ситуациях и сделает невозможным гибкое развитие процедуры экспертизы в ПАО «Газпром». Даны рекомендации по разработке ряда «советующих» инструментов – элементов будущих экспертных систем, последующему выстраиванию из них каскада модулей для облегчения принятия экспертных решений и разработки гибкой системы мониторинга.

10. Разработаны научные основы создания и предложены пути совершенствования систем и средств прогнозирования и мониторинга штатных и чрезвычайных ситуаций на ОКВИ ЕСГ. На основе фактографического анализа имеющихся данных показано, что статистика аварийности в ЕСГ по месяцам, кварталам, годам, дням месяца, дням в неделе неоднородна. Предложена классификация штатных ситуаций по их масштабам, обнаружено, что месячная статистика общей аварийности и статистика крупномасштабных аварий различна.

Сделан вывод, что «обычную» аварийность и аварийность крупных аварий надо исследовать с системных информационных позиций, в частности, нельзя объединять статистику в единые статистические показатели без предварительного доказательства того, что такое смешивание корректно. Предложено использовать различия в статистике крупных и мелких аварий для уточнения прогнозных оценок масштабов аварий. Возможность построения экспертной системы правил, уточняющей масштабы событий в зависимости от сезона, дня рабочей недели и других факторов продемонстрирована в виде продукционной системы – типовой для классических экспертных систем. Методом «скользящего среднего» установлен факт, что статистика аварий не является статистикой случайного блуждания.

11. Развита методология прогнозирования природных и техногенных опасностей, рисков возникновения нештатных и чрезвычайных ситуаций, динамики и их последствий, оценки последствий. Разработан модулярный классификатор аварийности, который позволяет объяснить существенную долю случайности. В сочетании с другими подходами, адекватными изучаемому объекту, этот подход позволит давать более точные экономико-статистические оценки и прогнозы состояния безопасности и устойчивости ЕСГ.

12. На основе анализа исходных данных сформулирован системный подход к решению задач прогнозирования на основе комплексного использования моделей прогноза различного временного масштаба. Дано теоретическое обоснование волновому характеру динамики значений наблюдаемых показателей аварийности с позиций моделей экономико-математического анализа научно-технологического развития. Изложена методика макропрогноза количества аварийных дней в последующие годы. Полученные оценки использованы как параметры расчётных моделей при построении кривой динамики аварийности с помощью паттерн-анализатора. Приведены результаты обработки статистики аварийности в ЕСГ, наглядно иллюстрирующие изменения структуры аварийности и подтверждающие необходимость комплексного решения задач оценок и прогноза аварийности в рамках создания развитой экспертной системы.

13. Проанализированы особенности процедуры предсказания конкретных дат (или интервалов дат), в которые наиболее вероятно возникновение нештатных ситуаций. Изложена авторская методика построения классификатора факторов аварийности дней, подробно описаны теоретические и алгоритмические особенности, которые реализованы и внедрены в виде прикладной программы «паттерн-анализа аварийности» для ЭВМ.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

Монографии:

1. Бочков А. В., Лесных В. В., Радаев Н. Н. Методические аспекты задания требования, оценки и обеспечения защищенности объектов газовой отрасли от противоправных действий. Монография – М.: ВНИИГАЗ, 2009. – 164 с.

2. Бочков А. В., Демидова Н. С., Башкин В. Н. Математическое моделирование процессов переноса в системах жизнеобеспечения и защиты человека в экстремальных условиях природной среды. Серия «Вести газовой науки». Монография – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – 282 с.

3. Барсуков А. Н., Бочков А. В., Лесных В. В. Ситуационные центры. Мониторинг, прогнозирование и управление кризисными явлениями в газовой отрасли. Часть 1. Мониторинг и прогнозирование. Монография. – М.: НИИ-газэкономика, 2015. – 528 с.

Разделы в монографиях:

1. Bochkov, A.V. Hazard and Risk Assessment and Mitigation for Objects of Critical Infrastructure, pp. 57-135. In: Ram M., Davim J. (eds) Diagnostic Techniques in Industrial Engineering. Management and Industrial Engineering. Springer, Cham, DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-65497-3_3, Publisher Name: Springer, Cham. – 2017. ISBN 978-3-319-65496-6 – 247 p.

2. Bochkov, A.V., Zhigirev, N.N. Development of Computation Algorithm and Ranking Methods for Decision-Making under Uncertainty, pp. 121-154. In: Ram M., Davim J. (eds) Advanced Mathematical Techniques in Engineering Science. Publisher Name: CRC Press, ISBN 9781138554399 – CAT#K43293. Series: Science, Technology and Management (May 17, 2018) – 222 p.

Статьи в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук:

1. Бочков А.В. Использование метода анализа иерархий для целей категорирования критически важных объектов по степени совокупного ущерба и риску противоправных действий // «Проблемы анализа риска», № 4 (том 5), 2008. – С. 6-13.

2. Бочков А.В., Радаев Н.Н. Выбор метода обработки матриц парных сравнений по критериям простоты и точности // Известия РАН. Теория и системы управления, 2009, Том 48, № 5, С. 76–81.

3. Бочков А.В., Лесных В.В., Лаврухин Ю.Н. Методические вопросы обеспечения защищенности и живучести береговых и шельфовых нефтегазовых

объектов // «Проблемы анализа риска» № 3, т. 7, 2010. – С.6-32.

4. Бочков А.В., Лесных В.В. Методические подходы к обеспечению защиты морских и шельфовых нефтегазовых объектов от противоправных действий // Bochkov, A.V., Lesnykh, V.V. Technical Approaches to Supply Sea and Off-shore Oil and Gas Objects Protection From Illegal Actions // Springer, NATO Security Through Science Series в сб. трудов семинара Россия-НАТО «Сопоставительный анализ воздействия технологического и интеллектуального терроризма на сложные технические системы», 5-7.04.2011, г. Москва. NATO Science for Peace and Security Series E: Human and Societal Dynamics - Vol. 102 // Comparative Analysis of Technological and Intelligent Terrorism Impacts on Complex v Technical Systems – N.A. Makhutov and G.B. Baecher (Eds.), IOS Press, 2012, 69-80 pp. – 216 p.

5. Бочков А.В., Демидова Н.С. Самоорганизация пространственно-временных структур процессов переноса в сорбционных системах поддержания газового состава космических объектов / Вестник Московского авиационного института, № 2, т. 19, 2012. – С. 35-46.

6. Бочков А.В., Ушаков И.А. Решение задачи распределения ресурсов, предназначенных для защиты объектов критической инфраструктуры от террористических атак на основе субъективных экспертных оценок // Надёжность, №1(52). – 2015. – с. 88-92 (русс.) 93-96 (англ.).

7. Bochkov A., Lesnykh V., Lavrukhin Yu., Zhigirev N. Some methodical aspects of critical infrastructure protection // Safety Science 79(2015), pp. 229-242. doi:10.1016/j.ssci.2015.06.008.

8. Бочков А.В., Жигирев Н.Н. О некоторых прикладных задачах безопасности и ситуационного управления Единой системы газоснабжения на основе анализа потока оцененных данных методом опорных векторов / Вести газовой науки: науч.-технический сб. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2017. - № 1 (29): Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности. – 278 с. - С. 129-141.

9. Бочков А.В., Жигирев Н.Н., Ридли А.Н. Метод восстановления вектора приоритетов альтернатив в условиях неопределенности или неполноты экспертных оценок. Надёжность. 2017; 17(3): 41-48. DOI:10.21683/1729-2646-2017-17-3-41-48.

10. Бочков А.В., Пономаренко Д.В. Научно-методические основы мониторинга и прогнозирования состояния производственной безопасности ПАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2017. № 3 (749) – С. 20-30.

11. Бочков А.В. Проблемы оценки опасностей и управления рисками объектов критически важной инфраструктуры Группы Газпром: аналитический обзор / Вести газовой науки: науч.-технический сб. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2018. - № 2 (34): Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности. – С. 51-87.

12. Бочков А.В., Лесных В.В., Пономаренко Д.В. Современные подходы к мониторингу состояния промышленной безопасности опасных производствен-

ных объектов // «Проблемы анализа риска», № 1 (том 15), 2018. - С. 6-17.

Прочие публикации по теме исследования:

1. Bochkov A.V., Ushakov I.A., Lesnykh V.V. Risk Analysis under Uncertain Conditions: Min-max Approach // SRA 2006 Annual Meeting Risk Analysis in a Dynamic World: Making a Difference December 3-6, 2006 - Baltimore, Maryland.

2. Бочков А.В., Радаев Н.Н. Оценка террористической угрозы для объекта // Труды Международной научной школы МАБР - 2007, С.-Пб., 4-8.09.2007.

3. Бочков А.В., Лесных В.В., Ушаков И.А. Анализ риска террористических атак: использование минимаксного критерия. – Страховое дело, № 3, 2007. - С. 43-46. № 4, 2007. – С. 31-33.

4. Бочков А.В., Лесных В.В., Радаев Н.Н., Сафонов В.С. Структура формализованной модели нарушителя // Доклад на научно-практической конференции «Практика применения системного анализа и специального программного обеспечения в создании комплексных систем безопасности и антитеррористической защиты объектов», С.-Пб., 18.10.2007.

5. Бочков А.В., Лесных В.В., Радаев Н.Н., Сафонов В.С. Проблемы разработки модели внешнего нарушителя в задаче оценки эффективности системы физической защиты морского объекта // доклад на конференции «Безопасность морских объектов» (SOF-2007), 30-31.10.2007, ВНИИГАЗ, Москва, 2007.

6. Bochkov A.V., Ushakov I.A. Sensitivity analysis of optimal counter-terrorism resources allocation under subjective expert estimates // Reliability: Theory & Applications, Sun-Diego (California, USA), Vol.2 No.2, June, 2007. – p.78-85.

7. Bochkov A.V., Samsonov R.O., Safonov V.S., Lesnykh V.V., Radaev N.N. Methodological and model aspects of ensuring the RF Gas Supply Unified System's resistance to terrorist attacks // International Workshop on Natural Disasters & Emergency Management, September 22-24, 2007, Beijing, China, 2007.

8. Бочков А.В., Радаев Н.Н. Оценка террористической угрозы для объекта // БДИ (Безопасность, достоверность, информация), № 2, 2008. – С.17-19.

9. Бочков А.В., Радаев Н.Н. Оценка террористической угрозы для объекта // Труды международной научной школы МАБР-2008, С.-Пб., 24-28.06.2008.

10. Бочков А.В., Радаев Н.Н. Оценка террористического риска при эксплуатации объектов // Труды международной научной школы МАБР-2008, С.-Пб., 24-28.06.2008.

11. Бочков А.В., Лесных В.В., Тимофеева Т.Б. Методика построения априорной зависимости величины удельного ущерба от длительности перерывов энергоснабжения конечных потребителей // Труды международной научной школы МАБР-2009, С.-Пб., 7-11.07.2009.

12. Бочков А.В., Лесных В.В., Красных Г.В. Концептуальные основы системы поддержки принятия решений по повышению защищенности критически важных объектов структурно сложных топливно-энергетических систем // Труды конференции Безопасность критичных инфраструктур и территорий: Мате-

риалы III Всероссийской конференции и XIII Школы молодых ученых. Екатеринбург: УрО РАН, 404 с., 2009. – С.37-38.

13. Бочков А.В. Категорирование критически важных объектов по уязвимости к возможным противоправным действиям. Экспертный подход // БДИ (Безопасность, достоверность, информация), № 1 [82] янв.-фев., 2009. – С.28-30.

14. Bochkov A.V., Radaev N.N. Determining a priori distribution of error-free running time for high reliability components by Delphi method // Reliability & Risk Analysis: Theory & Applications, № 1, March, 2009. – p.47-56

15. Bochkov A., Radaev N. Application of analytic hierarchy process to determining a priori distribution of error-free running time for high-reliability components. Труды международной конференции ISANP 2009, July 29 - August 1, 2009, Pittsburgh, USA.

16. Бочков А.В., Кричевская А.С. К вопросу о построении рациональной стратегии ситуационного управления операционными рисками // Труды международной научной школы МАБР-2010, С.-Пб., 6-10.07.2010.

17. Бочков А.В., Красных Г.В. Метод построения доминирующей последовательности в задаче ситуационного управления операционными рисками комплексных нефтегазовых проектов // Труды II-й международной научно-практической конференции «Эффективное управление комплексными нефтегазовыми проектами», 21-24.09.2010, г. Ухта.

18. Бочков А.В., Жигирев Н.Н., Красных Г.В., Ерёмкин Г.В. Разработка методических основ и алгоритмов для реализации адаптивной схемы расчета индикаторов внештатных и предкризисных ситуаций на объектах ЕСГ России // Сб. трудов конф. «Ситуационные центры и информационно-аналитические средства поддержки принятия решений», РАГС при Президенте РФ, 27-28.04.2010.

19. Бочков А.В., Барсуков А.Н., Дьяконов М.Н., Лесных В.В. Проблемы построения корпоративной системы ситуационного управления // Сб. трудов конф. «Ситуационные центры и информационно-аналитические средства поддержки принятия решений», РАГС при Президенте РФ, 27-28.04.2010.

20. Бочков А.В., Жигирев Н.Н. Развитие методов прогнозирования и выявления слабо формализованных угроз устойчивому функционированию структурно-сложных систем на основе статистического и семантического анализа открытых информационных источников // Сб. трудов IX научно-практической конф. «Ситуационные центры 2011», РАГС при Президенте РФ, 27-28.04.2010.

21. Бочков А.В., Барсуков А.Н., Лесных В.В., Дьяконов М.Н. Опыт построения, методическое и программное обеспечение корпоративной системы ситуационного управления ОАО «Газпром» // Сб. трудов 9-ой научно-практической конф. «Ситуационные центры 2011», РАГС при Президенте РФ, 26-27.04.2011.

22. Bochkov A.V. Approaches to the Construction of Adaptive Situation Control Systems of Structurally Complex Systems Under Uncertainty // Труды международной конференции ISANP-2011, Sorrento (Naples - ITALY) June 15-18, 2011.

23. Bochkov A.V., Zhigirev N.N., Lesnykh V.V. Dynamic Multi Crite-

ria Decision Making Method for Sustainability Risk Analysis of Structurally Complex Techno-Economic Systems / Reliability: Theory & Applications, Vol. 7, № 2(25), 2012, June, p.36-42.

24. Bochkov A.V., Ushakov I.A. Antiterrorism Resources Allocation Under Fuzzy Subjective Estimates / Reliability: Theory & Applications, Vol. 7, № 3(26), 2012, September, p.21-26.

25. Bochkov A., Lesnykh V., Timofeeva T. Qualitative analysis and typing inter-system accidents // Safe Societies, Coping with complexity and major risk. The 22nd SRA-E Conference. Trondheim, Norway, 17-19 June, 2012, p. 18. – 159 p.

26. Бочков А.В., Лесных В.В., Жигирев Н.Н. Экспертное обеспечение деятельности современного ситуационного центра. Инновационные методы обработки и анализа неструктурированных данных // Сб. тезисов конф. «Система распределённых ситуационных центров», 16-17.10.2014, Воронеж, 2014. – С.21.

27. Бочков А.В., Красных Г.В. Определение априорного распределения возможной оценки уровня угроз в задаче ситуационного управления потенциально опасными территориями с использованием экспертных методов // Труды Международной научной школы МАБР-2014, 18-20.11.2014, г. С.-Пб.

28. Bochkov A.V., Zhigirev N.N., Lesnykh V.V. ANP Modification for Decision Making Under Uncertainty // International Symposium of the Analytic Hierarchy Process 2014, Washington D.C., U.S.A.

29. Бочков А.В., Жигирев Н.Н. Развитие метода сравнения альтернатив при принятии решений в условиях неполной определенности экспертных предпочтений // Труды международной научной школы МАБР-2015 (С.-Пб., 17-19.11.2015) / СПб. ГУАП, 2015. – 304 с. – С. 224-232.

30. Бочков А.В., Лесных В.В. Оценка защищённости критически важного объекта от террористических действий // доклад на III Научно-практической конференции «Совершенствование гражданской обороны в Российской Федерации», г. Москва, 10.10.2006 г.

31. Бочков А.В. Развитие комплексного подхода к управлению рисками объектов критической инфраструктуры // Труды Международной Научной Школы МАБР - 2016 (С.-Пб., 25-28.10.2016) / ГУАП, СПб., 2016, с. 87-96.

32. Бочков А.В. Применение метода аналитических сетей в задаче экспертной оценки рисков нефтегазовых инвестиционных проектов // Эффективное управление комплексными нефтегазовыми проектами (ЕРМІ-2011): тезисы докладов III Международного научно-практического семинара, 20-22.09.2011, М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011., 56 с. (с.44).

33. Бочков А.В. Методические вопросы обеспечения защищённости объектов критической инфраструктуры структурно-сложных систем // Proceedings 7th DQM International Conference Life Circle Engineering and Management ICDQM-2016, June 29-30, 2016, Prijedor, Serbia; Џаџак. – XIII, 543 p. – pp. 43-71.

34. Бочков А.В., Жигирев Н.Н., Чуманов Д.М. О методе ранжирования не-технологических приоритетов при формировании программ инновационного развития нефтегазовых компаний в условиях неполной определенности экс-

пертных предпочтений // Юбилейная книга. ООО «НИИГазэкономика» 50 лет. – М.: ООО «НИИГазэкономика», 2017. – 176 с., С. 84-88.

35. Бочков А.В., Жигирев Н.Н., Лесных В.В. Некоторые методологические аспекты защиты объектов критической инфраструктуры ТЭК // Юбилейная книга. ООО «НИИГазэкономика» 50 лет. – М.: ООО «НИИГазэкономика», 2017. – 176 с., С. 127-132.

36. Бочков А.В., Жигирев Н.Н. Использование метода опорных векторов для поиска скрытых закономерностей в задачах классификации ситуаций, описываемых оцененными вопросниками //Proceedings 8th DQM International Conference Life Circle Engineering and Management ICDQM-2017, June 29-30, 2017, Prijevor, Serbia. – XIV 491 p. – pp. 107-128.

Подписано к печати « » 2019 г.

Заказ №

Тираж 120 экз.

1 уч. – изд.л, ф-т 60x84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

По адресу: 142717, Московская область,

Ленинский район,

сельское поселение Развилковское, пос. Развилка,

Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1,

ООО «Газпром ВНИИГАЗ».