

На правах рукописи



Спесивцев Александр Васильевич

**ФОРМАЛИЗАЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ЯВНЫХ И НЕЯВНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ ДЛЯ
ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)

Научный консультант:	Соколов Борис Владимирович , доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
Официальные оппоненты:	Кежаев Валерий Алексеевич доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированного управления ракетных войск и артиллерии Михайловской военно-артиллерийской академии, г. Санкт-Петербург Ефимов Владимир Васильевич доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе ОАО «Авангард» в г. Санкт-Петербурге Громов Виктор Никифорович доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы киберфизических систем и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого
Ведущая организация	федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 2019 г. в ____ часов ____ минут на заседании диссертационного совета Д 002.199.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., д. 39.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук <http://www.spiiras.nw.ru>

Автореферат разослан " ____ " _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.199.01
кандидат технических наук



А.А. Зайцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

В условиях появления принципиально новых классов сложных объектов (СЛО) проблема оценивания их состояния начинает занимать особое место в общем комплексе исследований, связанных с автоматизацией и интеллектуализацией процессов проактивного мониторинга и управления указанными объектами.

При этом само понятие «сложный объект» включает в себя такие аспекты сложности как «структурная сложность», «функциональная сложность», «сложность принятия решений», «организационная сложность», «сложность поведения» в том числе и субъекта (субъектов), входящего, в общем случае, в состав СЛО, в сферу ответственности которого входит, например, реализация процессов генерации, хранения и использования данных, информации и знаний о той или иной предметной области (ПрО).

Особенностью современных СЛО является то, что они функционируют в условиях, задаваемых, как правило, конечным множеством количественных и неколичественных (вербальных) переменных и соответствующих пространственно-временных, технических и технологических ограничений. При этом, многие задачи оценивания их состояния формулируются и описываются как вербально на профессиональном языке данной отрасли знаний, так и формально с использованием различных классов моделей.

Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что широкое применение на практике при оценивании состояний СЛО нашли методы и модели, базирующиеся на использовании экспертных знаний. В настоящем исследовании под экспертными знаниями понимаются явные и неявные знания эксперта, накопленные в процессе практической работы в конкретной ПрО и позволяющие ему выступать в качестве «интеллектуальной измерительно-диагностической системы» на различных этапах жизненного цикла СЛО.

Неявные экспертные знания, наряду с явными, играют ключевую роль в процессах принятия решений о состоянии объекта любого уровня сложности. **Неявные знания** (англ. tacit knowledge) – вид знания, которое не может быть формализовано в виде слов или алгоритмов и передано другим. Согласно исследованиям ученых-психологов, в состав неявных знаний включают такие результаты творческой деятельности человека, как ноу-хау, секреты мастерства, умения, навыки и опыт. На практике эффективность использования неявных экспертных знаний наиболее ярко проявляется в ситуациях, когда лицу, принимающему решения (ЛПР), необходимо обоснованно и своевременно формировать и выдавать на СЛО соответствующие управляющие воздействия при недостаточности, неполноте и противоречивости данных и информации о текущей обстановке, а также в условиях существенных временных ограничений.

Под состоянием СЛО в конкретный момент времени будем понимать множество его параметров (характеристик), определяемых контекстом решаемой задачи, либо поставленной целью и позволяющих ЛПР оперативно и обоснованно принимать решение о работоспособности (неработоспособности) СЛО и возможности дальнейшего его использования по назначению.

Влияние на СЛО множества различных по своей физической природе факторов, необходимость учета его взаимодействия с окружающей средой, увеличение числа входящих в состав СЛО элементов, а также стремительный рост числа взаимосвязей между ними, приводят к необходимости использования знаний и опыта экспертов как при решении проблем оценивания состояния СЛО, так и управления им. В этих условиях особую остроту и актуальность начинают приобретать проблемы формализованного описания состояния конкретного СЛО или его элементов в удобном для дальнейшей компьютерной обработки виде.

В качестве дальнейшей детализации перечисленных проблем можно привести наиболее типичные слабоструктурированные задачи, решение которых осуществляется с привлечением экспертных знаний. К указанным задачам могут быть отнесены: прогнозирование развития материальных, энергетических и информационных процессов в СЛО; определение альтернативных вариантов принятия решений при оперативном управлении системой; оценивание уровня целевых и информационно-технических возможностей с обеспечением «благоприятных» процессов; обоснование критериев оценки эффективности применения СЛО; определение целей и задач управления СЛО с упорядочением их по степени важности и согласованности решений (последовательности реализации); распределение ресурсов (средств) для достижения поставленных целей и др.

Таким образом, для широкого круга слабо структурируемых (трудно формализуемых) проблем научно-технической сферы экспертные знания и соответствующие процедуры их обработки являются весьма востребованными.

Результаты многочисленных исследований показали, что качество оценивания состояния СЛО непосредственно влияет на оперативность и обоснованность принятия управленческих решений, направленных на повышение эффективности функционирования указанных объектов. При оценивании данных состояний СЛО остро встают вопросы количественной интерпретации получаемых неколичественных (неизмеряемых, вербальных) данных и информации с использованием соответствующих шкал. В таких условиях оценивание фактического состояния СЛО представляется важнейшей проблемой, требующей научно обоснованного подхода к выбору моделей и методов интеграции (обобщения) количественной и неколичественной информации о текущем состоянии рассматриваемого объекта в условиях неопределенности.

Степень разработанности темы. Говоря в целом о разработках моделей и методов оценивания состояния СЛО в условиях неопределенности, следует, прежде всего, отметить, что в данной области накоплен богатый опыт, полученный как отечественными, так и зарубежными учеными. Так, например, проведены многочисленные исследования по формализации и анализу недостоверной, неполной, неточной и противоречивой информации применительно к задачам моделирования, управления и оценивания состояния СЛО. К числу наиболее значимых научных и практических результатов по рассматриваемым в диссертации вопросам следует отнести разработанные и широко используемые в настоящее время комбинированные способы формализации факторов неопределенности, методы и алгоритмы учета нечетких отношений, нечеткие модели оптимизации и принятия решений, нечеткие модели многокритериальных задач, нечеткие лингвистические модели и др. В получении этих научных и практических результатов выдающуюся роль сыграли работы следующих отечественных и зарубежных ученых: Аверкина А.И., Алексеева А.В., Беллмана Р.Е., Блишуна А.Ф., Борисова А.Н., Геловани В.А., Громова В.Н., Дюбуа Д., Еклунда П., Ефимова В.В., Заде Л.А., Калинина В.Н., Кежаева В.А., Крумберга О.А., Коско В., Кофмана А., Ларичева О.И., Мамдани Е.Х., Мелихова А.Н., Миронова А.Н., Мицумото М., Налимова В.В., Нариньяни А.С., Орловского С.А., Охтилева М.Ю., Павлова А.Н., Поспелова Д.А., Поспелова Г.С., Прада Х., Прангишвили И.В., Резникова Б.А., Соколова Б.В., Сугено М., Ульянова С.В., Юсупова Р.М. и многих других авторов.

В различных зарубежных странах созданы и успешно работают широко известные научные школы, среди которых можно выделить американскую (Заде Л.А., Беллман Р.Е., Чанг С.Л. и др. – основы нечетких множеств и нечетких топологических пространств), японскую (Сугено М., Мамдани Е.Х. – нейро-нечеткие принципы моделирования и управления СЛО), французскую (Дюбуа Д., Прад Х. – теория возможностей в нечетких системах), рижскую (Алексеев А.В., Борисов А.Н., Крумберг О.А. – принятие

решений в условиях неопределенности). Из отечественных – московскую (Поспелов Д.А., Аверкин А.И., Нариньяни А.С. – основы искусственного интеллекта, принцип нефакторов), петербургскую (Юсупов Р.М., Соколов Б.В., Павлов А.Н., Миронов А.Н., Дмитриев А.К., Охтилев М.Ю., Гаврилова Т.А. и др. – основы квалиметрии моделей и полимодельных комплексов, оценивание состояния СЛО в условиях неопределенности).

Вместе с тем, к сожалению, до сих пор на конструктивном уровне не решена проблема формального описания как самих СЛО, так и процессов их функционирования в динамически изменяющейся обстановке. Также недостаточно разработан научно-методический аппарат (методы, алгоритмы, методики) комплексного оценивания и прогнозирования состояния рассматриваемых классов СЛО в условиях воздействия различных видов возмущающих факторов, сведения о которых слабо структурированы, а в некоторых случаях даже и противоречивы.

Таким образом в результате проведенного анализа современного состояния и основных тенденций развития существующего специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задач оценивания, оптимизации, управления, принятия решений и обработки данных, информации и знаний о состоянии СЛО, можно сделать вывод, что проблема разработки моделей и методов представления, формализации и использования явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния указанных объектов на основе нечетко-возможностного подхода является *новой* и весьма *актуальной*.

Схематически наличие противоречий и содержание порожденной ими научной проблемы показано на рис. 1.

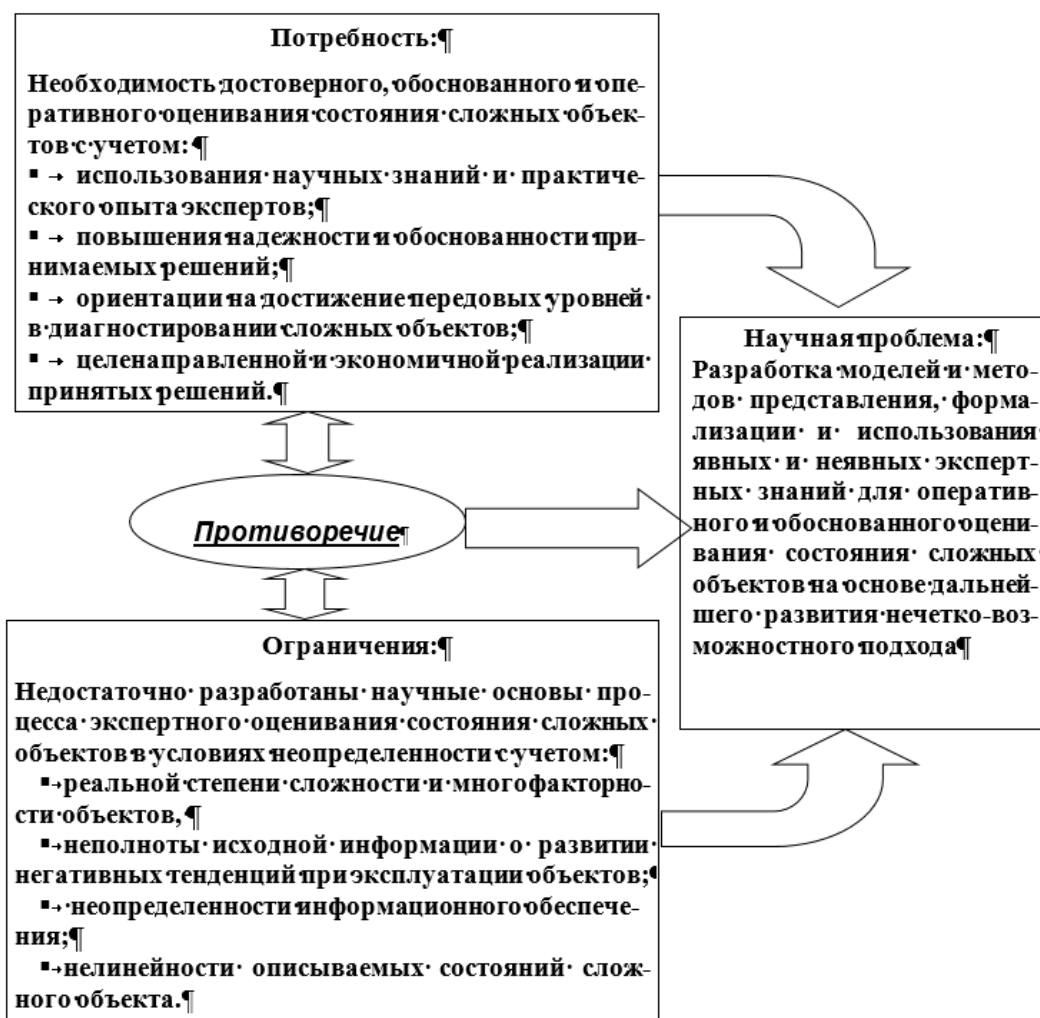


Рисунок 1 – Решаемая в диссертации научная проблема

В связи с этим *целью диссертационного исследования* является разработка моделей и методов представления, формализации и использования явных и неявных экспертных знаний для оперативного и обоснованного оценивания состояния сложных объектов на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода.

В соответствии с поставленной целью в работе сформулированы следующие основные *научно-технические задачи*:

1. Провести системный анализ существующих и перспективных подходов к формализации и последующего решения проблем разработки научно-методического обеспечения оценивания состояния СЛО на основе экспертных знаний в условиях неопределенности.

2. Разработать концепцию оценивания состояния СЛО в условиях неопределенности с использованием явных и неявных экспертных знаний на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода.

3. Разработать методологические и методические основы построения и использования нового класса нечетких моделей для оценивания состояния СЛО на основе использования явных и неявных экспертных знаний, включающие в себя подзадачи:

3.1 Разработка комбинированного метода извлечения и формализации явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СЛО на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода и теории планирования экспериментов.

3.2 Разработка методов задания новых симметризованных форм представления нечетких чисел, а также расширенных и дополнительных арифметических действий над ними, сохраняющих исходный уровень нечеткости знаний экспертов.

3.3. Разработки методики и критериев проверки адекватности и полезности моделей оценивания агрегированного (обобщенного) состояния СЛО на основе экспертных знаний.

4. Провести экспериментальную апробацию теоретических исследований при решении задач оценивания состояния СЛО в реальных условиях.

С учетом вышеизложенного *объектом диссертационного исследования* являются различные классы материальных и нематериальных СЛО естественного и искусственного происхождения.

Предметом исследования являются модели и методы извлечения, представления, формализации, обработки, анализа и использования явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СЛО в условиях неопределенности.

Методы исследования. В качестве основных использованы методы системного анализа, фундаментальные положения теории принятия решений, теория надежности, теория нечетких множеств и отношений, теория планирования экспериментов, теория многокритериального выбора, вероятностно-статистические методы, имитационное моделирование.

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов состоит в следующем:

1. Разработаны концепция и метод формализованного описания интуитивно-словесных и неявно заданных экспертных знаний о состоянии СЛО на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода и теории планирования экспериментов, которые, **в отличие от известных подходов**, позволяют использовать дополнительную неколичественную (вербальную) экспертную информацию для построения математических моделей оценивания состояния СЛО. При этом представляется возможным выявление как явных, так и неявных экспертных знаний, отражающих накопленный опыт эксперта при эксплуатации конкретных СЛО с учетом неопределенностей их состояния и условий функционирования, что существенно повышает оперативность и обоснованность принимаемых управленческих решений.

2. Разработаны и доказаны правомерность применения новой симметризованной формы представления нечетких чисел (LR)-типа и унифицированной формы записи расширенных и дополнительных арифметических операций над ними, нечувствительных к знаку нечетких чисел, **отличающихся от общепринятых форм** тем, что вместо трех формул для каждой из арифметических операций в зависимости от сочетания знаков нечетких чисел можно обходиться только одной. Такое нововведение существенно упрощает работу по формализации экспертных знаний в виде лингвистических переменных для последующего их анализа и принятия решения при оценивании состояния конкретного СЛО.

3. Обобщены, расширены и исследованы свойства дополнительных арифметических операций, введенных методами символьной математики, для сохранения первоначальной нечеткости и приведения подобных членов при обработке массивов знакопеременного ряда нечетких чисел (LR)-типа в симметризованной форме, которые, **в отличие от традиционных подходов**, позволяют компенсировать увеличение нечеткости, сохранить исходную информативность конечного результата, что соответствует здравому смыслу операторов, использующих указанные данные на практике, и составляет научную основу для решения проблемы построения аналитических моделей с привлечением экспертных знаний.

4. Введен новый класс нечетких моделей для оценивания состояния СЛО, построенных на основе комбинации методов нечетко-продукционного подхода и теории планирования экспериментов, который, **в отличие от традиционно используемых подходов к оцениванию состояния СЛО**, дает возможность распространения методов теории планирования экспериментов на область теории нечеткой логики с возможностью формализации экспертных знаний аналитическим выражением.

5. Разработан способ задания нечеткой нормы в виде модуля нечеткого числа (LR)-типа в нечетких метрических пространствах на множестве нечетких чисел, который позволяет различать классы состояния СЛО на основе экспертных знаний, **отличающийся от существующих методических подходов** тем, что устраняет неоднозначность определения расстояния в многомерных пространствах нечетких переменных функционирования СЛО для оценивания различия между его состояниями. При этом в формализованном виде модель принятия решения, базирующаяся на знаниях экспертов и отражающая их опыт и интуицию, может быть оперативно представлена также в виде аналитического выражения для нахождения количественных характеристик состояния СЛО в многомерном пространстве нечетких переменных с последующим отнесением этой оценки к определенному классу состояний СЛО.

6. Разработаны методика и критерии оценивания адекватности и полезности расчетов состояния СЛО с использованием построенных полиномиальных моделей с учетом нечетких данных об особенностях функционирования СЛО и заданных условий эксплуатации. Введенные критерии, **в отличие от известных**, предоставляют ЛППР возможность априорного оценивания несмещенности и эффективности получаемых с помощью полиномиальных моделей оценок. Наиболее предпочтительно применение разработанных методики и критериев в тех ситуациях, когда факторное пространство состоит исключительно из неколичественных или неизмеримых переменных.

7. Разработаны оригинальные прикладные методики решения различных классов прикладных задач оценивания и прогнозирования состояния конкретных СЛО на основе явных и неявных знаний, **отличительной особенностью** которых является существенное сокращение времени и ресурсов на разработку и использование соответствующих нечетко-возможностных моделей принятия управленческих решений, связанных с оцениванием состояния СЛО в динамически изменяющихся условиях, обеспечивающих по-

вышение их обоснованности, а также сохранение и последующее использование знаний, полученных от высококвалифицированных специалистов при исследовании и решении аналогичных классов задач в других предметных областях.

Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в следующем: обоснована возможность использования явных и неявных экспертных знаний для синтеза моделей оценивания состояния СЛО на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода; введены новые методы представления, формализации и использования нечетких чисел (LR)-типа и доопределены на основе символьной математики дополнительные арифметические операции над нечеткими числами знакопеременного ряда для сохранения исходного уровня нечеткости; разработан комбинированный метод построения моделей с учетом количественной и не количественной экспертной информации; разработаны модели представления интуитивно-словесных и неявно-заданных экспертных знаний о состоянии СЛО в аналитическом виде и критерии проверки степени их адекватности и полезности.

Результаты теоретических исследований, выполненных в диссертации, получили всестороннюю реализацию при решении практических задач оценивания состояния СЛО в различных предметных областях.

Практическая значимость и реализация результатов работы

Результаты диссертационных исследований имеют междисциплинарный характер и представляют собой научные основы количественного решения задач извлечения, представления, формализации знаний и использования опыта высококвалифицированных специалистов-экспертов о состоянии СЛО для представления их в аналитическом виде, что способствует повышению оперативности и обоснованности принятия соответствующих управленческих решений в условиях неопределенности. Практическое значение полученных результатов состоит в их доведении до уровня инженерных методик, с использованием которых удастся оценивать и обрабатывать нечеткую (вербальную) экспертную информацию о состоянии конкретного СЛО в виде лингвистических переменных для последующей структуризации и формализации данной информации при оценивании состояния СЛО в динамически изменяющейся обстановке.

С использованием разработанных методов, моделей и алгоритмов получены оценки фактического состояния широкого класса СЛО в различных областях науки и техники, что позволило обосновать принимаемые конкретные инженерные решения по оцениванию их состояния и прогнозированию рисков возможного разрушения, а также целесообразности дальнейшей эксплуатации указанных СЛО.

При этом в ходе практической реализации диссертационных исследований были получены различные положительные эффекты в следующих конкретных предметных областях.

1. Космонавтика. В центре испытаний и контроля эксплуатации филиала ФГУП «ЦЭНКИ» - КЦ «Южный» при оценивании степени критичности наземных составных частей ракетно-космических комплексов по остаточному ресурсу. Реализация результатов диссертационной работы позволила *повысить точность прогнозирования* остаточного ресурса примерно в 1,7 раза при экономии в 1,5 раза времени на разработку экспертных прогнозов.

Для космодрома «Плесецк» была создана интеллектуальная информационно-диагностическая система мониторинга оценивания технического состояния (ТС) химических источников тока (ХИТ), базирующаяся на использовании результатов тепловизионных наблюдений. Также были разработаны методика *неразрушающего* контроля и новая процедура прогнозирования остаточного ресурса ХИТ. Получен патент РФ № 2467436 от 20.11.2012

Для космодрома «Байконур» разработан способ количественного оценивания степени развития дефектов при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов. Способ защищен патентом РФ № 2673629 от 28.11.2018.

2. Цветная металлургия. Для «Горно-металлургической компании «Норильский никель» в рамках выполнения НИР «Интеллектуальная автоматизированная система управления процессом плавки ПВ-3 Медного завода» была синтезирована сложная многофакторная модель оценивания состояния СЛО в виде семантической сети на специфичном ограниченном словаре с использованием полиномиального преобразования НЕ-факторов. В результате применения разработанной автоматизированной системы *повысилась качество ведения процесса, выражающееся в стабилизации продуктов плавки, повышении производительности процесса и облегчении работы операторов при принятии решений* о состоянии СЛО. Фактически в рамках данного направления исследований реализован наиболее общий подход к решению проблемы распознавания и оценивания состояния СЛО в различных ПрО, таких, например, как, цветная и черная металлургия, горное и нефтегазовое производство, космонавтика, медицина, ветеринария, сельское хозяйство и др. Получен патент РФ № 2 571 968 от 27.12.2015.

Применение усовершенствованного нечетко-возможностного подхода к построению модели пирометаллургического процесса обжига в кипящем слое позволило *повысить производительность* промышленного агрегата на 25-30% и *снизить количество предаварийных ситуаций*. Получен патент РФ № 2204616 от 20.05.2003.

3. Строительное дело. В Заполярном филиале «Горно-металлургической компании «Норильский никель» и Норильском промышленном районе (г. Норильск) на Медном заводе по разработанной методике мониторинга и прогнозирования состояний зданий и сооружений с пространственно-распределенной топологией получена модель оценивания остаточного срока службы дымовой трубы металлургического предприятия, эксплуатируемой в нештатных условиях. В результате удалось *повысить качество и обоснованность управленческих решений и сохранить в работоспособном безаварийном состоянии дымовую трубу в течение 12 лет*.

4. МЧС России. В Управлении по делам ГО и ЧС г. Норильска реализована методика оценивания технического состояния высоко рискованных спецсооружений, фундаментов зданий и сооружений Норильского промышленного района. В результате реализации указанной методики была разработана предписывающая документация по снижению числа чрезвычайных ситуаций в Норильском промышленном районе.

5. Экология. В Норильском региональном отделении Международной академии наук экологии и безопасности природы и человека (МАНЭБ) внедрены и используются информационные и методические материалы для количественного *оценивания загрязненности металлами геокриолитозоны* Норильского промышленного района, прогнозирования *устойчивости оснований*, построенных на многолетнемерзлых грунтах плотины пирротинохранилища и дамбы хвостоохранилища. Цель использования результатов диссертационного исследования состояла в *разработке планов мероприятий по сохранению экологической обстановки и предотвращению возрастания негативных факторов*, влияющих не только на Норильский промышленный район, но и на экологическое состояние всего Таймырского полуострова.

Создана экспресс-методика и на ее основе проведена оценка морфодинамических процессов в береговой зоне Финского залива.

Практическая значимость полученных результатов подтверждена пятью актами реализации, полученными из соответствующих организаций.

Положения, выносимые на защиту

1. Концепция оценивания состояния СЛО с использованием явных и неявных экспертных знаний на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода.
2. Методы представления, формализации и использования нечетких чисел (LR)-типа и введенные на основе символьной математики дополнительные арифметические операции над нечеткими числами знакопеременного ряда для сохранения исходного уровня нечеткости явных и неявных знаний экспертов.
3. Комбинированный метод построения моделей оценивания состояния СЛО на основе формализации явных и неявных экспертных знаний.
4. Модели представления интуитивно-словесных и неявно-заданных экспертных знаний о состоянии СЛО в аналитическом виде.
5. Методика и критерии проверки адекватности и полезности разработанных моделей оценивания состояния СЛО.
6. Результаты применения теоретических исследований при решении практических задач оценивания состояния реальных СЛО в различных предметных областях.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается всесторонним анализом современного состояния исследований решаемой проблемы в различных предметных областях, согласованностью результатов моделирования и проведенных расчетов с фактическими данными, полученными в процессе эксплуатации СЛО, использованием при проведении диссертационных исследований апробированного современного математического аппарата, согласованностью разработанной методологии с общими принципами и концепциями оценивания состояния СЛО, а также экспериментальной апробацией полученных теоретических результатов с положительным эффектом от внедрения в промышленности и научных предприятиях. Кроме того, достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается их положительной апробацией на международных и всероссийских научно-технических конференциях и семинарах, проводимых в организациях РАН, в высших учебных заведениях РФ, на предприятиях промышленности.

Апробация результатов исследований. Результаты диссертационной работы докладывались на более чем 50 межрегиональных, всероссийских, международных научно-технических конференциях, семинарах и симпозиумах, основные из которых за последние пять лет: VIII-XIX Международные конференции «Мягкие вычисления и измерения SCM`2005 – SCM`2018» (Санкт-Петербург, 2005-2018); Международная научно-практическая конференция «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке», (Москва, 2015); XXXI Межведомственная научно-техническая конференция «Развитие научно-технических аспектов методологии испытаний и эксплуатации с целью повышения эффективности применения существующих средств и систем экспериментально-испытательной базы» (Плесецк, 2015); Международный конгресс АПК – стратегический ресурс экономического развития государства: Материалы для обсуждения (СПб, 2015); Межвузовском научно-практическом семинаре «Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства (28 апреля 2016)» (СПб, ВИ(ИТ) ВА МТО, 2016); Digital Transformation and Global Society. First International Conference, DTGS 2016, St. Petersburg, Russia, June 22-24, 2016; XVI Всероссийской конференции DICR-2017, Новосибирск, 4-7 декабря 2017 года. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017; Engineering for Rural Development. 16th International Scientific Conference. Maj 24-26, 2017. Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. Jelgava, 24.-26.05.2017; Engineering for Rural Development. 17th International Scientific Conference. Maj 23-25, 2018. Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. Jelgava, 23.-

25.05.2018; Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова (Санкт-Петербург, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано более 110 научных трудов, в том числе: 18 статей в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук, 4 патента РФ, 2 свидетельства на программы; 16 статей зарегистрированы в SCOPUS, издано 6 монографий, где соискатель является одним из соавторов, остальные публикации – в научно-технических журналах и сборниках научных трудов.

Личный вклад автора в основных публикациях с соавторами характеризуется следующим образом: в публикациях [5,18,26,28,29,32-37] автору принадлежат концепция и методология решения проблемы построения моделей нового класса на основе явных и неявных экспертных знаний; в [12-15,26] – методы формализации и использования новой симметризованной формы представления нечетких чисел и дополнительных операций над массивами знакопеременного ряда нечетких чисел (LR)-типа для сохранения исходного уровня нечеткости; в [2-11,32-37,39] введен новый класс математических моделей, построенных на основе комбинации методов нечетко-продукционного подхода и теории планирования экспериментов, для создания интеллектуальных автоматизированных систем управления технологическими процессами; в [1,6,9,10,28,29,38-41] предложены методика и критерии различия классов состояния СЛО в многомерных пространствах нечетких переменных; в [6,11,16,17,19-25,27-31] предложены критерии проверки степени адекватности и полезности моделей оценивания состояния СЛО с учетом нечетких данных об особенностях его функционирования и заданных условий эксплуатации.

Результаты теоретических исследований при личном участии автора получили всестороннюю реализацию при решении практических задач оценивания и прогнозирования состояния реальных СЛО в различных предметных областях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений, общим объемом 377 страниц, в том числе 328 источников литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, проведен анализ исследуемой научной проблемы и обоснован подход к ее решению, определены цель и задачи диссертационного исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных в диссертации результатов, а также приведены сведения об их реализации и апробации.

В первой главе проведен системный анализ проблемы сложности формального описания и оценивания состояния объектов произвольной природы. В ходе исследований установлено, что, несмотря на активное внедрение средств автоматизации принятия решений, даже в космонавтике от 60% до 70% завершающих решений принимаются на комиссионной или личностной экспертной основе. Такое положение связано с тем, что на современном этапе научно-технического прогресса все усложняющиеся процессы и технологии мониторинга и управления СЛО с трудом поддаются описанию детерминированными и вероятностно-статистическими методами, которые в условиях существенной неопределенности могут дать лишь приблизительное представление о возможных сценариях поведения СЛО при оценивании его состояния.

Поэтому *требуется разработка* новых принципов, подходов, методов и способов повышения оперативности и обоснованности принимаемых решений с применением современных математических методов при работе с неопределенностью и нечеткостью

исходной информации о состоянии СЛО. Такими возможностями обладают *методы оценивания состояния СЛО с использованием экспертных знаний*.

Наиболее перспективным направлением в извлечении, представлении и формализации явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СЛО является моделирование, суть которого состоит в дальнейшем развитии принципа нечетко-возможностного подхода (по Заде-Мамдани) применительно к представлению СЛО с использованием элементов теории нечетких множеств и нечеткой логики.

Существующая и широко используемая на практике классическая коммутативная диаграмма реализации процесса выработки и принятия решения о состоянии СЛО на основе технологии накопления и обработки данных (*экстенционал* – по Д. Поспелову) приведена на рисунке 2а, а предлагаемая в диссертации коммутативная диаграмма на основе явных и неявных экспертных знаний – выделенная цветом – представлена на рисунке 2б (*интенционал* – по Д. Поспелову).

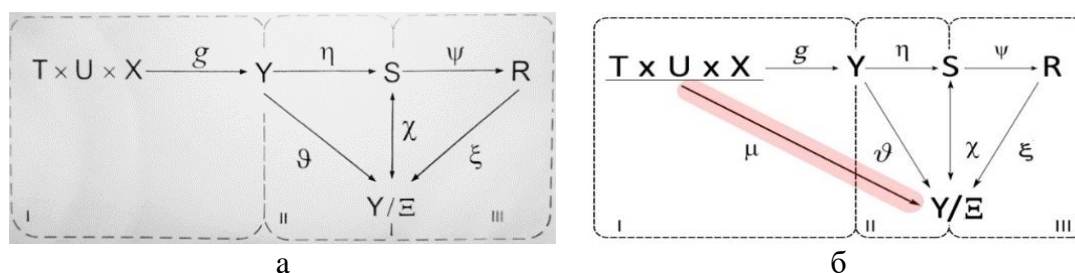


Рисунок 2 – Технологии реализации процессов выработки и принятия решений на основе: а - данных и б - экспертных знаний (выделено цветом)

На рисунке 2 обозначены: T – множество моментов времени t , в которые наблюдается объект; U, Y – множества входных U и выходных Y воздействий соответственно; X – множество состояний объекта, характеризуемое в каждый момент времени $t \in T$ набором переменных $x_k, k = 1, \dots, n$; Y/Ξ – фактор-множество состояний СЛО; S – пространство шкал измерения входных и выходных воздействий; R – множество возможных корректировок решений о состоянии СЛО посредством отображений ψ и ξ ; g – оператор выходов, описывающий механизм (формулы, алгоритмы) формирования выходного воздействия Y ; η – оператор шкалирования всех входных и выходных переменных; χ – оператор взаимно-однозначного соответствия Y/Ξ со шкалой выходной переменной Y ; $\vartheta = \eta \circ \chi: Y \rightarrow Y/\Xi$ – композиция отношений в задаче диагностирования состояния СЛО. Проведем модификацию ранее предложенного описания, введя следующий новый элемент μ – оператор принятия решения экспертом при оценивании, контроле и диагностировании состояния СЛО.

Естественно полагать, что в этом случае метазнания $MZ^3(q, t, \mu)$ эксперта включают профессиональные явные $Z_{np}^3(q, t, \mu)$ и неявные $Z_n^3(q, t, \mu)$ знания о состоянии конкретного СЛО, где $q \in Q$ – множество уровней компетенций и эрудиции по решаемым задачам. В указанной ситуации раскрытие неопределенности состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний позволяет конструктивно сформировать следующее отображение:

$$\mu: T \times U \times Y \rightarrow Y/\Xi.$$

Для формирования этого отображения предложена коммутативная схема (рисунок 3), представляющая последовательность взаимосвязанных процессов *извлечения, представления и формализации явных и неявных экспертных знаний*.

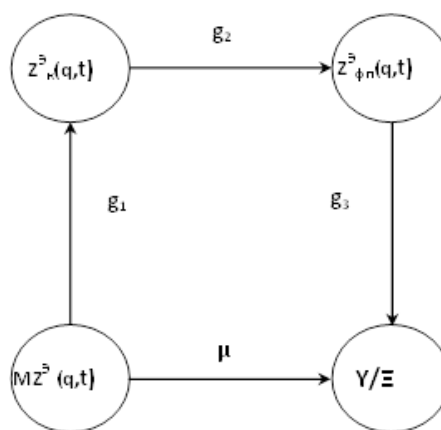


Рисунок 3 – Коммутативная схема процессов извлечения, представления и формализации явных и неявных экспертных метазнаний

При этом само отображение μ может быть представлено композицией перечисленных отображений $\mu = g_1 \circ g_2 \circ g_3$, где g_1 – *извлечение множества характеристик (параметров) состояния конкретного СЛО $Z_{\kappa}^{\exists}(q,t,\mu)$ из метазнаний $MZ^{\exists}(q,t,\mu)$ эксперта, включающих профессиональные явные $Z_{np}^{\exists}(q,t,\mu)$ знания, состоящие в умении эксперта разобраться в проблеме, провести постановку задачи, неявные знания $Z_n^{\exists}(q,t,\mu)$, навыки, опыт, интуиция, а также знания в сопредельных предметных областях $Z_{comp}^{\exists}(q,t,\mu)$* ; g_2 – *представление характеристик $Z_{\kappa}^{\exists}(q,t,\mu)$ в виде лингвистических переменных и формирование факторного пространства $Z_{\Phi n}^{\exists}(q,t,\mu)$, в котором эксперт принимает решение о состоянии СЛО для конкретной задачи*; g_3 – *формализация явных и неявных экспертных знаний*. При этом g_3 предусматривает построение моделей формализованного представления явных и неявных экспертных знаний о состоянии СЛО, в том числе и в виде полиномиального выражения с использованием методов теории планирования экспериментов на множестве нечетких продукционных правил факторного пространства $Z_{\Phi n}^{\exists}(q,t,\mu)$ с диагностированием на фактор-множестве Y/Ξ классов состояний СЛО, элементы которого в ходе распознавания должны быть отнесены к одному из множества классов Y/Ξ .

Таким образом, на концептуальном уровне описания обобщенная структура и содержание решаемых в диссертации проблемы и соответствующих частных задач, связанных с разработкой моделей и методов извлечения, представления, формализации и структуризации явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СЛО, могут быть представлены в следующем виде:

$$\langle X, \Phi_z, E_{z_{\text{np}}}, F_z, M_z, MZ^{\exists}(q,t,\mu), Z_{i\delta}^{\exists}(q,t,\mu), Z_i^{\exists}(q,t,\mu), Z_{\bar{m}i\delta}^{\exists}(q,t,\mu), K, T/\Xi \rangle,$$

где Φ_z – множество методов извлечения знаний; $E_{z_{\text{np}}}$ – множество методов представления знаний; F_z – множество методов и алгоритмов формализации знаний; M_z – множество условий, необходимых для выполнения всех операций при построении моделей; K – множество показателей качества решения задач оценивания состояния СЛО; T/Ξ – фактор-множество классов состояния СЛО, к одному из которых следует отнести результат определения.

С учетом вышеизложенного, предметом диссертационного исследования является разработка методов, моделей и алгоритмов решения задач оценивания состояния СЛО на основе формализации, обработки и анализа явных и неявных экспертных знаний.

В диссертации решение сформулированной научно-технической проблемы было предложено проводить в рамках шести главных направлений исследований (см. рис 4), которые были, в свою очередь, сгруппированы в следующие четыре класса задач.

Задачи класса А – задачи, связанные с разработкой методики *извлечением* явных и неявных экспертных знаний о состоянии СЛО с учетом особенностей его эксплуатации с целью определения множества характеристик, формирования на их основе факторного пространства и создания вербально-числовых шкал для каждого фактора.

Задачи класса Б – задачи, связанные с разработкой методик *представления* экспертных знаний нечеткими продукционными правилами, и базирующиеся на введении: новых форм задания нечетких чисел (LR)-типа; расширенных и дополнительных арифметических операций над массивами нечетких чисел (LR)-типа; применении (LR)-аппроксимации для построения алгоритмов нечеткого вывода в пространствах лингвистических переменных; определении метрики в многомерных пространствах нечетких чисел (LR)-типа.

Задачи класса В – задачи, связанные с разработкой методики *формализации* экспертных знаний в виде полиномиальных (однопараметрических и многопараметрических) моделей на основе комбинированного использования методов теории планирования экспериментов и инженерии знаний.

Задачи класса Г – задачи, связанные с разработкой методик *оценивания* качества и полезности разработанных однопараметрических и многопараметрических моделей оценивания состояния конкретных СЛО в различных предметных областях.

Далее при описании последующих глав диссертации будет приведена дальнейшая уточненная постановка, детализация и решение всех задач, входящих в перечисленные выше классы.

На основании результатов проведенного системного подхода на содержательном уровне суть решаемой в диссертации проблемы сводится к следующему: *существуют метазнания эксперта* (в общем случае экспертов) об исследуемом СЛО, в которых содержатся сведения о составе и структуре характеристик, описывающих состояние СЛО; о допустимых пространственно-временных, технических и технологических ограничениях, определяющих особенности условий эксплуатации СЛО в рамках его целевого предназначения. *Требуется* разработать методологию и специальное модельно-алгоритмическое обеспечение, а также соответствующие прототипы программных средств решения задач извлечения, формализации, обработки и использования явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СЛО с целью повышения оперативности и обоснованности принятия управленческих решений, связанных с функционированием указанных объектов в условиях неопределенности.

Во второй главе диссертации приведены подробные результаты *первого, второго и третьего направлений* (см. рисунок 4) диссертационных исследований, связанных с вопросами извлечения и представления явных и неявных экспертных знаний.

Для решения задач класса А, связанных с *извлечением* из метазнаний эксперта характеристик (параметров) СЛО и отношений между ними (см. рисунок 3), разработана методика, состоящая из следующих шагов.

Шаг 1. Сформировать множество факторов $Z_{\kappa}^{\exists}(q, t, \mu)$ из метазнаний $MZ^{\exists}(q, t, \mu)$ эксперта, включающих явные профессиональные $Z_{np}^{\exists}(q, t, \mu)$, сопредельные $Z_{comp}^{\exists}(q, t, \mu)$ и неявные $Z_{н}^{\exists}(q, t, \mu)$ знания, используемое в дальнейшем для решения задачи оценивания

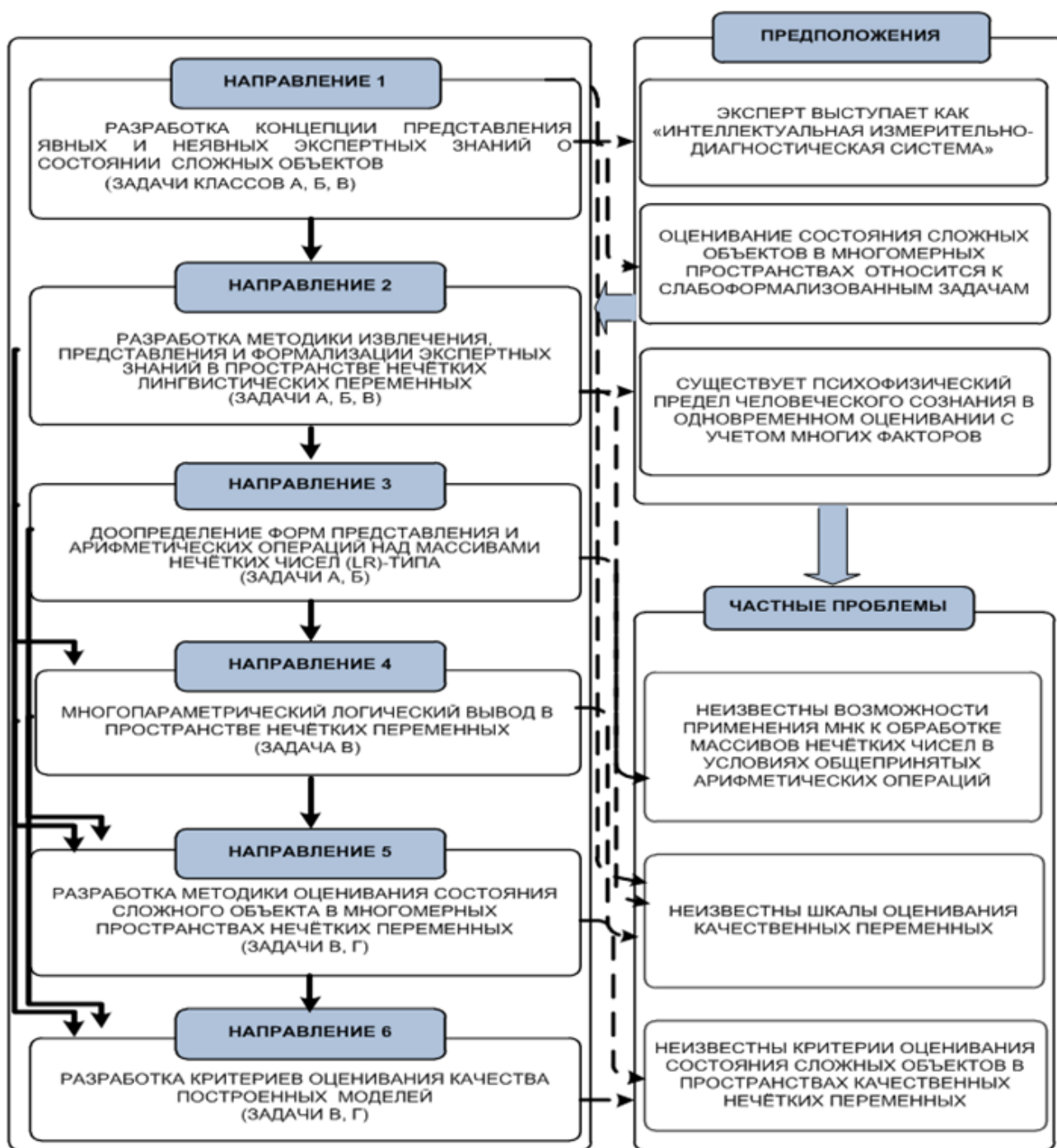


Рисунок 4 – Основные направления диссертационных исследований

состояния конкретного СЛО в пространстве выделенных факторов. При этом требуется учесть как *количественные (измеряемые)*, так и *неколичественные (вербальные, определяемые органолептически) факторы*.

Шаг 2. Описать пределы изменения факторов оппозиционными (*полярными*) шкалами в допустимых пределах функционирования СЛО.

Шаг 3. Сформировать и обосновать факторное пространство (не более семи) из выбранного множества факторов для решения конкретной задачи оценивания состояния СЛО, факторы которого удовлетворяют условиям измеримости (количественной и/или органолептической), и имеют понятный физический смысл и т.д.

Шаг 4. Создать вербально-числовые таблицы для соотнесения словесных описаний факторов к соответствующим им количественным интервалам.

На рисунке 5 приведен пример представления фактора «количество пусков ракет космического назначения со стартового комплекса» в виде количественной лингвистической переменной, где терм-множества (небольшое, ..., большое) задаются в виде нечетких чисел (LR)-типа. На рисунке 5 введены следующие обозначения. Для оси абсцисс: сверху задана лингвистическая (вербальная) шкала; снизу – числовые значения в стандартизованном масштабе $[-1,+1]$; числовая шкала в натуральных физических единицах. Для оси ординат: $\mu_A(x_i)$ — функция принадлежности, значения которой находятся в интервале $[0,1]$. В ходе детального анализа действий с лингвистическими переменными выяснилось, что и форма представления, и арифметические операции над нечеткими числами (LR)-типа требуют нового описания и новых операций. В связи с этим была предложена **новая симметризованная форма** задания нечетких чисел (LR)-типа (рисунок 6).

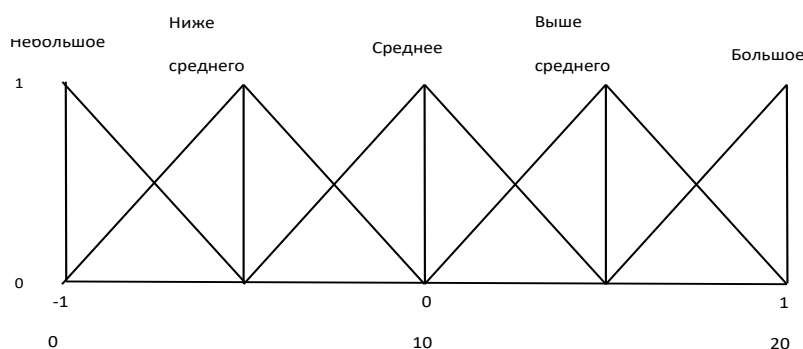


Рисунок 5 – Определение шкал количественной лингвистической переменной

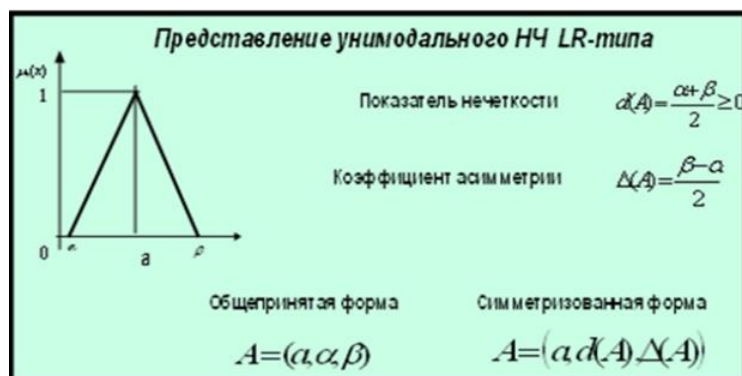


Рисунок 6 – Представление унимодального нечеткого числа (LR)-типа в общепринятой и симметризованной формах

На основе данной симметризованной формы были получены *формулы* расширенных арифметических операций над нечеткими числами (LR)-типа, *независящие от знака нечетких чисел*, как это имеет место в общепринятом представлении. Так, операция умножения нечетких чисел (LR)-типа A и B содержит три формы (1):

$$A \otimes B = \begin{cases} (a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, a\gamma + b\alpha, a\delta + b\beta)_{LR} & a > 0, b > 0; \\ (a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, b\alpha - a\delta, b\beta - a\gamma)_{LR} & a < 0, b > 0; \\ (a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, -b\beta - \alpha\delta, -b\alpha - a\gamma)_{LR} & a < 0, b < 0; \end{cases} \quad (1)$$

а заменяющая их одна операция с нечеткими числами $A = (a, d(A), \Delta(A))$ и $B = (a, d(B), \Delta(B))$ заданными в симметризованной форме, примет следующий вид:

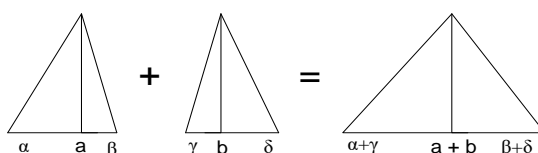
$$A \otimes B = (ab, |a|d(B) + |b|d(A), a\Delta(B) + b\Delta(A)) \quad (2)$$

Такое описание облегчает дальнейшее представление и использование содержательной (вербальной) экспертной информации при решении различных классов прикладных задач мониторинга и управления СЛО.

В диссертации детально представлены разработанные новые *математические модели выполнения унифицированных арифметических операций над нечеткими числами (LR)-типа*, используемые при формализации явных и неявных экспертных знаний.

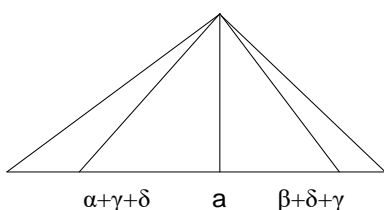
При работе с массивами нечетких чисел (LR)-типа в традиционном представлении возникает проблема: многократное выполнение арифметических операций над нечеткими числами приводит к абсурдному результату в виде катастрофического возрастания нечеткости до такой величины, при которой теряется смысл всех выполненных арифметических действий.

Например, для двух нечетких чисел $A = (a, \alpha, \beta)$ и $B = (b, \gamma, \delta)$ результаты арифметических операций в общепринятой форме геометрически могут быть представлены следующим образом: $A + B = (a + b, \alpha + \gamma, \beta + \delta)$



В этом случае, вычитая из суммы добавленное нечеткое число B , получим

$$(A + B) - B = (a + b - b, \alpha + \gamma + \delta, \beta + \delta + \gamma) = (a, \alpha + \gamma + \delta, \beta + \delta + \gamma)$$



При работе с массивами нечетких чисел (LR)-типа использование существующих арифметических операций операции вряд ли целесообразно из-за катастрофического увеличения уровня нечеткости конечного результата. Таким образом, *особую актуальность приобретает задача доопределения* арифметических операций над массивами знакопеременного ряда нечетких чисел (LR)-типа, удовлетворяющих требованию *сохранения исходной нечеткости*, которая на практике, в отличие от существующих формальных подходов, не изменяется у эксперта при многократном использовании своих знаний для оценивания одного и того же фактора.

Дополнительной арифметической операцией, с использованием идей и методов символической математики, предложено назвать операцию, для которой выполняется следующее условие:

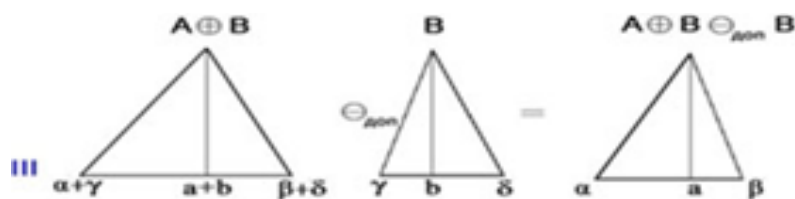
$$C = A \underset{\text{доп}}{*} B \rightarrow C \underset{\text{доп}}{*} B = A, \quad (3)$$

где A, B и C – нечеткие числа (LR)-типа в симметризованной форме; $*$ – обозначение дополнительной операции, противоположной по отношению к операции $*$.

Тогда, используя дополнительные арифметические операции сложения и вычитания двух нечетких чисел, можно провести следующие эквивалентные преобразования, приводящие к исходному нечеткому числу A :

$$(A + B) \cdot \underset{\text{доп}}{\ominus} B = (a + b - b, d(A) + d(B) - d(B), \Delta A + \Delta B - \Delta B) = (a, d(A), \Delta A) = A \quad (4)$$

В геометрической интерпретации такое действие имеет вид, показанный ниже



Введенные *дополнительные арифметические операции* обладают новыми свойствами, используемыми в дальнейшем при обработке опросных матриц, заполненных экспертом:

$$\begin{aligned}
 A \oplus_{\text{доп}} 0 &= A, \quad A \oslash_{\text{доп}} 1 = A, \quad A \ominus_{\text{доп}} A = 0, \quad A \oslash_{\text{доп}} A = 1, \\
 (A \oplus B) \ominus_{\text{доп}} B &= A, \quad (A \otimes B) \oslash_{\text{доп}} B = A, \\
 (A \oplus_{\text{доп}} B) \ominus_{\text{доп}} B &= (-1)A, \quad (A \otimes_{\text{доп}} B) \oslash_{\text{доп}} B = (-1)A.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Следует отметить, что *дополнительные арифметические операции компенсируют возрастание нечеткости при обработке массивов знакопеременного ряда нечетких чисел (LR)-типа*, что позволяет сохранить первоначальный уровень нечеткости, необходимый для дальнейшей обработки информации при оценивании состояния СЛО.

Таким образом, в результате выполненных исследований *введена новая форма* представления нечетких чисел (LR)-типа и *доопределены арифметические операции над ними*, что открывает широкие возможности по описанию явных и неявных экспертных знаний. В главе также были разработаны научные основы получения четких решений для нечетких уравнений. Для этого также были использованы дополнительные арифметические операции над нечеткими числами (LR)-типа в симметризованной форме, исследованы их свойства и доказана их применимость в рамках поставленной проблемы.

Третья глава посвящена решению *задач класса B – формализации* явных и неявных экспертных знаний, сформированных в результате решения задач классов A, B и представленных в виде *набора нечетких продукционных правил* для оценивания состояния СЛО в различных ситуациях.

В ходе проведенных исследований установлено, что при увеличении количества рассматриваемых факторов, описывающих состояния СЛО и представляющих собой лингвистические переменные, а также соответствующих делений шкал значений лингвистических переменных, наблюдается экспоненциальный рост числа нечетких продукционных правил. При этом, одним из главных препятствий при формализации экспертной информации выступает мультиколлинеарность (взаимозависимость) входных лингвистических переменных в реальных условиях функционирования СЛО, что существенно усложняет предлагаемую в диссертации структуризацию (агрегирование) продукционных правил в виде математических моделей, описываемыми полиномами, зависящими от компонентов вектора состояния СЛО.

В диссертации сформулирована **принципиально новая концепция оценивания состояния СЛО в многомерном пространстве нечетких переменных в виде аналитического выражения (в общем случае, аналитических выражений)** на основе формализации явных и неявных экспертных знаний, где сам эксперт выступает как «интеллектуальная информационно-измерительная и диагностическая система».

Конструктивной основой реализации данной концепции является предложенный в диссертации переход от нечетких аналитических выражений, описывающих проблему оценивания состояния СЛО в терминах функций принадлежности, к выражениям с аргументами (LR)-функций, что в конечном итоге позволило избежать «проклятия размерности» при построении алгоритмов нечеткого вывода и существенно облегчить последующее решение задач анализа и синтеза процедур аппроксимации экспертных зна-

ний аналитическими выражениями при исследовании и решении рассматриваемой в диссертации проблемы. При этом сформулированное соискателем в третьей в главе определение нечеткой метрики на множестве нечетких чисел (LR)-типа посредством нечеткой нормы, в отличие от существующих методических подходов, с одной стороны, обусловило метризацию многомерного нечеткого пространства, а с другой, – ликвидировало неоднозначность определения расстояния между двумя состояниями объекта.

В главе описан метод извлечения и структуризации экспертной информации на базе синтеза результатов, полученных в теории нечетких множеств и теории планирования экспериментов, позволивший описать обобщенное состояние СЛО в виде полиномиальных моделей. При этом коэффициенты соответствующего нелинейного полинома по сути содержат явные и неявные знания эксперта о внутренней логике рассматриваемой предметной области, связанной с функционированием СЛО и представленной продукционными правилами, описывающими причинно-следственные связи, определяющих порядок функционирования рассматриваемого объекта. При разработке данного метода были приняты следующие **основные предпосылки**.

1. Методы теории планирования экспериментов обеспечивают формирование **структуры** множества нечетких продукционных правил, описывающих причинно-следственные связи, которые определяют специфику функционирования СЛО в различных условиях обстановки.

2. Полный факторный эксперимент или дробные реплики от него обеспечивают формирование **матрицы опроса эксперта минимальным количеством обращений к нему**, причем каждая строка матрицы представлена нечетким продукционным правилом, отражающим явные и неявные экспертные знания о состоянии СЛО в ситуации, когда соответствующие переменные принимают свои наилучшие или наихудшие значения.

3. Ортогональность матриц планирования первой степени обуславливает **независимость коэффициентов** при каждой из переменных в стандартизованном виде полиномиального разложения, а **ротатабельность** матриц планирования – одинаковость возрастания ошибок определения переменных по всему факторному пространству, что коррелирует с мнением экспертов.

4. Полученное **аналитическое выражение** со значимыми коэффициентами является **отражением явных и неявных экспертных знаний** об изучаемом явлении или состоянии СЛО.

При этом согласно теории планирования экспериментов проведение опроса эксперта обеспечивает требуемую для решения задачи оценивания **внутреннюю структуру** (по Поспелову Д.А.) множества продукционных правил при минимуме обращений к эксперту.

В четвертой главе на основе проведенных в предыдущих главах теоретических исследований предложено методическое и алгоритмическое обеспечение для решения как задач оценивания состояния СЛО в пространствах лингвистических переменных, так и задач оценивания адекватности и полезности разработанных моделей (**четвертое и пятое направления выполненных диссертационных исследований**).

В начале главы проведена уточненная формальная постановка решаемой в диссертации проблемы, которая представлена в следующем виде.

Дано: множество высказываний эксперта об отдельных компонентах состояния СЛО в виде продукционных правил с нечетко заданными лингвистическими переменными:

$$A_{ji} = \langle \text{Если } X_1 = \tilde{U}_{j1} \wedge X_2 = \tilde{U}_{j2} \wedge \dots \wedge X_n = \tilde{U}_{jn}, \text{ то } Y = \tilde{V}_j \rangle, j = 1, \dots, 2^n \quad (6)$$

в n -мерном нечетком пространстве. При этом значения факторов принадлежат термножествам, заданных в нечетких лингвистических шкалах

$$\begin{aligned}\tilde{U}_{j_1} &\in T(X_1), M_1 : T(X_1) \rightarrow F(R^1), 1 = 1, \dots, n \\ \tilde{V}_j &\in T(Y), M_Y : T(Y) \rightarrow F(R^1)\end{aligned}\quad (7)$$

в виде нечетких чисел (LR) - типа

$$\begin{aligned}M_1(\hat{U}_{j_1}) &= \hat{U}_{j_1} = (\underline{U}_{j_1}, \bar{U}_{j_1}, \alpha_{j_1}, \beta_{j_1}, h_{j_1})_{LR}, \\ M_Y(\tilde{V}_{j_1}) &= \hat{V}_{j_1} = (\underline{V}_{j_1}, \bar{V}_{j_1}, \alpha_{j_1}, \beta_{j_1}, h_{j_1})_{LR}.\end{aligned}\quad (8)$$

Требуется: построить аппроксимирующую функцию

$$V = f(\vec{U}, \vec{B}), \quad (9)$$

с помощью которой будет проводиться оценивание состояния СЛО. При этом данная функция должна в n -мерном пространстве лингвистических переменных удовлетворять следующему условию:

$$\sum_{j=1}^{2^n} (V_j - f(U_{j_1}, \dots, U_{j_n}, \vec{B}))^2 \rightarrow \min_{\vec{B} \in F(R^k)}, \quad (10)$$

где U_{j_1} — нечеткое число; \hat{U}_{j_1} — значение нечеткого числа; $\tilde{U}_{j_1} \in T(X_1)$ — термножество лингвистической переменной X_1 , характеризующей соответствующую компоненту факторного пространства в задаче оценивания обобщенного состояния СЛО; $\tilde{V}_j \in T(Y)$ — термножество зависимой лингвистической переменной Y ; \vec{B} — вектор коэффициентов полинома; $F(R^k)$ — нечеткое k -мерное пространство.

Анализ (6) - (10) свидетельствует, что проблема количественного оценивания состояния СЛО в n -мерном пространстве нечетких переменных в диссертации решается на основе формализации экспертных знаний (6) с использованием разработанного диссертантом *комбинированного* подхода (включающего соответствующий метод, алгоритмы и методики) к построению и использованию модели, представленной функцией (9) в нечетком факторном пространстве (7), (8) при выполнении условия (10).

В главе подробное содержание предложенного комбинированного подхода описано в рамках соответствующей методики, включающей в себя следующие основные шаги.

Шаг 1. Формулировка задачи, выбор и обоснование факторного пространства, в котором принимается решение о состоянии СЛО, и построение вербально-числовых шкал для всех переменных. На данном шаге должны выполняться требования: полноты, представительности, достаточности, системности описания СЛО. (на данном шаге решаются *задачи класса А*, связанные с извлечением экспертных знаний).

Шаг 2. Представление выбранных характеристик в виде лингвистических переменных с соответствующими шкалами измерений. Построение множества нечетких продукционных правил имплицативного типа «если..., то...» как формы представления экспертных знаний. (на данном шаге решаются *задачи класса Б*, связанные с представлением экспертных знаний).

Шаг 3. Подготовка на основе методов теории планирования экспериментов опросной матрицы для выбранного факторного пространства и заполнение ее экспертом. Строки матрицы – нечеткие продукционные правила имплицативного типа «ситуация – оценка». Осуществляется построение полиномиального выражения методами теории

планирования экспериментов. (на данном шаге решаются **задачи класса В**, связанные с формализацией экспертных знаний).

Шаг 4. Оценивание качества построенного полиномиального выражения (модели) с использованием разработанных в диссертации правил и критериев. Проводится проверка выполнения требования адекватности оценивания состояния СЛО на основе сравнения результатов, полученных с использованием разработанной модели, и результатов, полученных при обработке мнений экспертов (**интенционал** по Д. Поспелову) (на данном шаге решаются **задачи класса В**, связанные с формализацией экспертных знаний).

Шаг 5. Проведение экспертом профессионального анализа качества построенных моделей, извлечение из построенных адекватных моделей методами математического анализа новой информации о специфике функционирования конкретного СЛО. Использование построенных моделей при формировании баз знаний, используемых далее на практике в прикладных задачах при нечетко-возможностном синтезе интеллектуальных автоматических систем управления различными типами технологических процессов (на данном шаге решаются **задачи класса Г**, связанные с использованием экспертных знаний).

В ходе диссертационных исследований были разработаны **методика и критерии проверки адекватности и полезности разработанных моделей оценивания состояния СЛО**, содержание которых **состоят** в следующем (в главе проведена дальнейшая детализация **Шага 4**).

Шаг 4.1. Проверка полезности модели осуществляется по разработанному критерию информативности следующего вида: $0,5d(A_y) < \sum_{i=1}^n |b_i|$, где $d(A_y)$ – коэффициент нечеткости Y (см. рисунок 7), b_i – все значимые коэффициенты полученной полиномиальной модели, исключая b_0 . Модель следует считать не несущей полезной информации (некорректной), если в максимальных интервалах изменения значений всех независимых переменных диапазон варьирования зависимой переменной Y не превосходит уровень ее нечеткости.

Шаг 4.2. Проверка адекватности построенного полиномиального выражения со значимыми коэффициентами, отражающего явные и неявные знания и опыт эксперта, осуществляется с применением одного из следующих показателей: показателя «возможности» по Дюбуа-Праду в точках факторного пространства, не вошедших в исходную выборку; остаточной дисперсии при уменьшении количества коэффициентов модели; коэффициента корреляции между экспертными оценками и расчетными значениями по полиному и др.

Шаг 4.3. Если в результате выполнения **Шага 4.2** разработанная аналитическая модель соответствует знаниям эксперта, то осуществляется дополнительная проверка адекватности и полезности расчетов, выполненных с использованием модели, с данными о действительном состоянии СЛО. Для этого используются показатели «возможности» и «коэффициент корреляции» (как на **Шаге 4.2**), значения которых рассчитываются на основе имеющихся статистических данных или базируются на результатах специально проведенных опытов при решении задачи оценивания состояния СЛО. Для моделей, построенных в факторном пространстве неколичественных лингвистических переменных, разработан критерий определения минимального количества значимых коэффициентов для достижения приемлемой точности, позволяющий обеспечивать с одной стороны, необходимую точность вычислений, а с другой – адекватность вычисленных значений мнению эксперта (см. рисунок 7). Таким образом, в результате реализации **предложенной в диссертации концепции обобщенного описания и оценивания состояния СЛО** в многомерном пространстве лингвистических переменных **разработан комбинированный**

рованный подход и соответствующее модельно-алгоритмическое обеспечение формализации явных и неявных экспертных знаний и представления их аналитическим выражением (аналитическими выражениями) используемым для оперативного и обоснованного оценивания состояния СЛО.

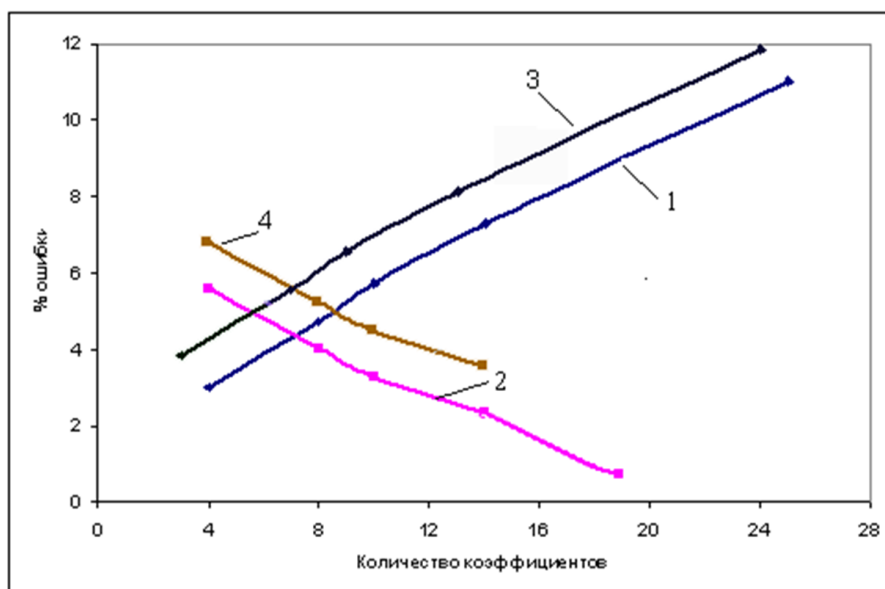


Рисунок 7 – Изменение ошибок вычисления по полиному от количества коэффициентов:
 1, 3 – линии ошибок косвенных измерений; 2, 4 – линии остаточных;
 1, 2 – все переменные определены с ошибкой 1,5%; 3, 4 – с ошибкой измерений 3%

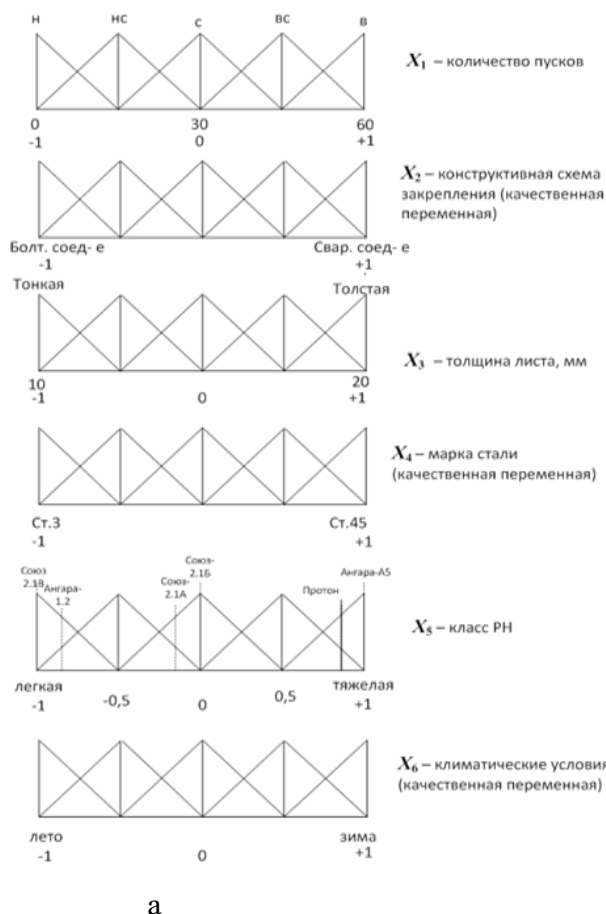
Применение разработанной методики в диссертации проиллюстрирована (рисунки 8 и 9) на примере построения математической модели состояния СЛО для решения задачи оценивания *возможности возникновения дефектов металлооблицовки* стартового комплекса после пуска ракет космического назначения.

На рисунке 8 показаны фрагменты решения *задач классов А и Б* для рассматриваемой прикладной области. На рисунке 9 показаны опросная (выделена кремовым цветом) и расчетная матрицы (*задача класса В*) в выбранном факторном пространстве (*задача класса А*) в виде лингвистических переменных (*задача класса Б*), оценки эксперта в вербальном и числовом виде и расчетные значения по полученному аналитическому выражению (*задачи класса В*). В опросной матрице (см. рисунок 9) *продукционное правило №31* читается так: «ЕСЛИ количество пусков X_1 «низкое» и конструктивная схема X_2 «болтовая» и X_3 толщина металлооблицовки «толстая» и X_4 марка стали «сталь 45» и класс ракетносителя X_5 «тяжелый» и климатические условия X_6 «зима», ТО возможность появления дефектов Y_3 между интервалами значений «Ниже средней» и «Средний».

В результате обработки экспертной информации получено следующее полиномиальное выражение (аналитическое агрегированное описание состояния рассматриваемого СЛО) только *со значимыми* коэффициентами:

$$Y = 0,412 + 0,073x_1 + 0,059x_2 - 0,026x_3 + 0,105x_5 + 0,026x_6 + 0,035x_1x_4 - 0,045x_2x_5 - 0,026x_3x_4 - 0,021x_4x_6 - 0,035x_1x_2x_6 + 0,026x_1x_3x_5 + 0,04x_2x_3x_4 \quad (11)$$

Количество значимых коэффициентов определялось, исходя из требования к точности оценивания независимой переменной Y , путем отбрасывания их наименьших по модулю значений (*задачи класса Г*) на рисунке 10.



а

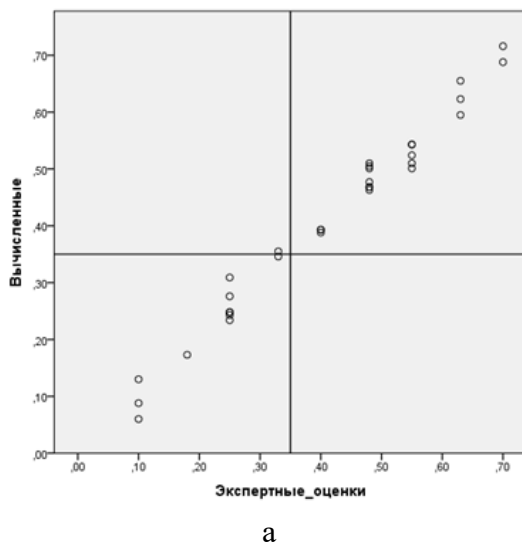
Интервалы	Мода	Обозначение	Косвенные признаки изменения состояния
Низкий 0,25 и ниже	0,10	Н	Конструктивные элементы металлооблицовки не имеют явных дефектов и повреждений. Эксплуатационные характеристики конструктивной схемы и прочностные характеристики металла полностью соответствуют эксплуатационной документации.
Ниже среднего 0,10 – 0,40	0,25	НС	Основные конструктивные элементы металлооблицовки не имеют явно выраженных дефектов и повреждений. Отмечаются незначительные дефекты листов металлооблицовки. Эксплуатационные характеристики, конструктивная схема и прочностные характеристики металла соответствуют эксплуатационной документации.
Средний 0,25 – 0,55	0,40	С	Основные конструктивные элементы металлооблицовки имеют отдельные дефекты, не оказывающие влияние на использование металлооблицовки стартового сооружения по назначению и (или) на ее долговечность. Проведение РБР не требуется.
Выше среднего 0,40 – 0,70	0,55	ВС	Отмечаются дефекты, оказывающие влияние на использование металлооблицовки СК по назначению и (или) на ее долговечность. Наблюдаются деформации и разрушения. Проведение РБР в незначительных объемах.
Высокий 0,55 и выше	0,70	В	Отмечаются дефекты, при наличии которых использование металлооблицовки СК невозможно или исключается из-за несоответствия требованиям безопасности или надежности. Проведение РБР металлооблицовки стартового сооружения в значительном объеме.

б

Рисунок 8 – Представление показателей в виде лингвистических переменных факторного пространства (а) и шкала арифметизации вербальных признаков состояния металлооблицовки числовыми значениями (б)

№ производственного правила	№ производционного	Количество циклов	Конструктивная схема металлооблицовки	Толщина листа металлооблицовки	Марка стали листов металлооблицовки	Класс РН	Климатические условия	Возможность возникновения дефекта (экспертные оценки)	Фрагмент расчетной матрицы				Расчетные по полиному	
									Вербальные	Числовые	x1 x2	x1 x3		...
	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Yэ	Yэ	x1 x2	x1 x3	...	x4 x5 x6	
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	Н	0,1	1	1	...	1	0,100
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	НС-С	0,33	-1	-1	...	-1	0,325
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	С-ВС	0,48	-1	1	...	1	0,484
...
30	1	1	-1	1	1	1	-1	С-ВС	0,48	-1	1	...	1	0,522
31	1	-1	1	1	1	1	-1	НС-С	0,33	-1	-1	...	-1	0,344
32	1	1	1	1	1	1	1	ВС-В	0,63	1	1	...	1	0,606

Рисунок 9 – Фрагмент решения задачи класса В – формализация экспертных знаний



	Количество дефектов	Конструктивный класс	Толщина листа металлообшивки	Материал	Класс РН	Классификация условий	Возможность возникновения дефекта	Привлекательность к ремонту
Плюсик	5	Сварная	20	Ст.3	РН «Союз»	Зима	0,484	С-ВС
Плюсик	7	Сварная	20	Ст.3	РН «Союз-2» – РБ «Фрегат»	Зима	0,564	ВС - В
Плюсик	1	Болтовая	20	Ст.3	«Ангара А-1»	Зима	0,242	Н-НС
Плюсик	1	Болтовая	20	Ст.3	«Ангара А-5»	Зима	0,305	НС
Байкинг	1	1	0	Ст.3	«Протон»	Лето	0,520	С-ВС

Рисунок 10 – Корреляция расчетных значений по полиному с экспертными оценками (а) и ситуационное оценивание расчетов по (11) с обстановкой на реальных объектах (б)

Результаты использования экспертных знаний, как следует из примера, полностью подтвердили возможность их применения для решения практических задач в условиях неопределенности.

В пятой главе приведена сводка методических и методологических (теоретических) основ решения проблемы синтеза моделей оценивания состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний, дающая общее представление о разработанных в диссертации подходах, методах, алгоритмах и моделях при решении различных классов задач оценивания состояния СЛО возникающих на практике.

Данные теоретические основы включают в себя: общие методологические основы, методические основы и множество частных методик практического извлечения, представления (*первое – четвертое направления*, рисунок 4), формализации явных и неявных экспертных знаний (*пятое направление*), а также критериев оценивания качества построенных моделей (*шестое направление*), что привело к появлению **новых классов прикладных математических моделей** для соответствующих предметных областей.

Далее в главе представлены результаты однопараметрического оценивания состояния нескольких СЛО в статических условиях.

Пример 1. Оценивание степени развития дефектов при эксплуатации насосных агрегатов (рисунок 11) заправочного оборудования ракетно-космических комплексов (НА 30 РКК).

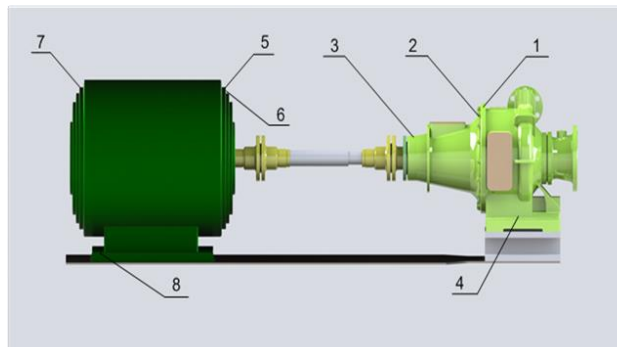


Рисунок 11 – Насосный агрегат заправочного оборудования ракетно-космических комплексов. Цифры – номера точек измерения виброскорости

Исходное состояние: известны измеренные величины виброскорости перед пуском ракет космического назначения. При этом сама виброскорость рассматривается как индикатор работоспособности НА ЗО РКК.

Требуется: построить модель оценивания величины виброскорости как обобщенного параметра (показателя), характеризующего интегральный эффект от действия ряда негативных факторов, возникающих в процессе эксплуатации.

Факторное пространство, выбранное экспертом (задача класса А):

X_1 – несоосность валов, (мкм); X_2 – перекося колец, (градусы); X_3 – показатель отсутствия ресурсной смазки (неколичественная переменная); X_4 – влияние наведенной вибрации (неколичественная переменная); X_5 – агрессивная среда в торцевом уплотнении (неколичественная переменная); X_6 – время простоя между циклами, (мес.); X_7 – температура опорных узлов, (оС); Y – виброскорость, степень вибрации, (мм/с).

На рисунке 12 показано лингвистическое представление выходной переменной Y , в качестве которой рассматривалась виброскорость.

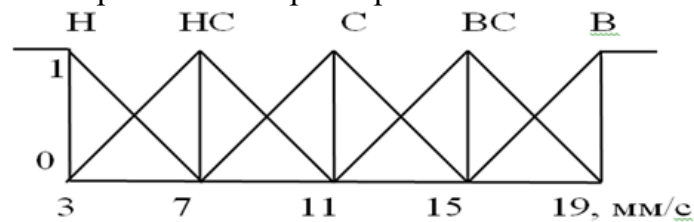


Рисунок 12 – Виброскорость Y как лингвистическая переменная (задача класса Б)

Итоговое полиномиальное выражение (решение задачи класса В) приняло вид:

$$Y = 11,25 + 2,3125x_1 + 1,0625x_2 + 1,0x_3 + 1,0x_4 + 1,625x_5 + 0,8125x_6 + 0,5625x_7 - 0,4375x_1x_3 - 0,875x_1x_7 - 0,5x_2x_6 - 0,375x_2x_7 - 0,3125x_5x_6 - 0,375x_1x_5x_7 + 0,4375x_2x_4x_5 \quad (12)$$

На рисунке 13 приведены результаты решения задач классов В и Г.

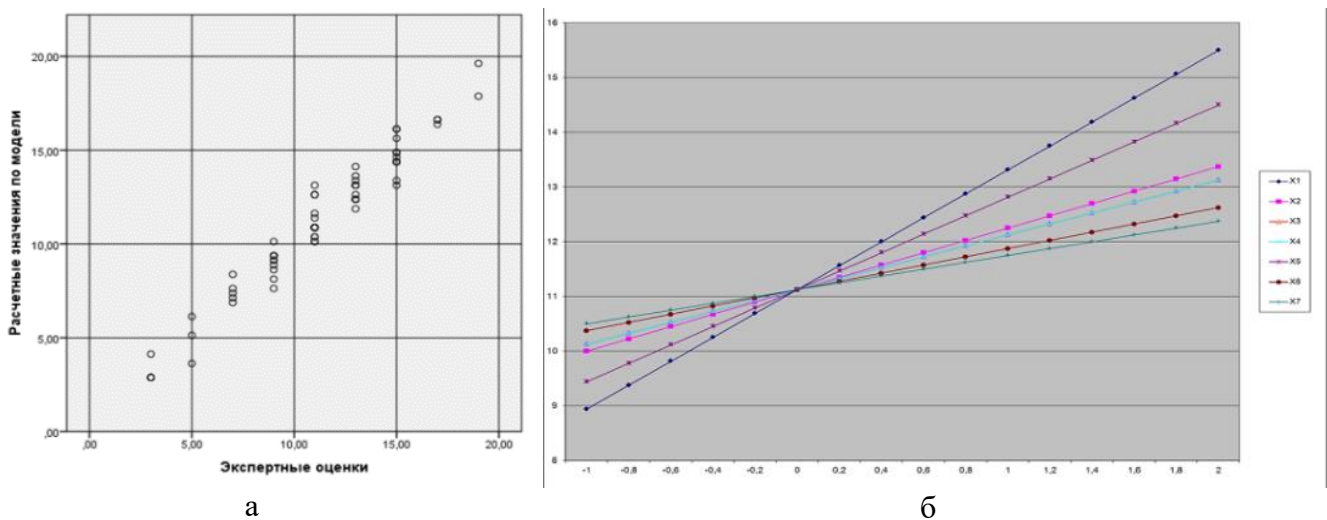


Рисунок 13– Корреляция оценок эксперта и расчетных значений (а) по полиному (12) и результаты численного эксперимента (б) по влиянию переменных факторного пространства на виброскорость

Достигнутый результат. Использование на практике созданной и внедренной методики дает возможность *количественного оценивания и прогнозирования* опасных последствий при развитии определенного вида дефекта и *способствует повышению качества и ускорения производства* наладочных работ НА ЗО РКК. Разработанный «Спо-

соб количественного оценивания степени развития дефектов при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов» защищен патентом РФ № 2673629 от 28.11.2018.

Пример 2. Создание методики оценивания технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса химических источников тока (ХИТ) на базе экспертных знаний.

Исходное состояние. Принятая в настоящее время система оценивания технического состояния (ТС) ХИТ (Плесецк) осуществляется на основе выборочного контроля, который предусматривает проведение испытаний *с разрушением приборов*. Это приводит к большим временным и экономическим затратам.

Необходимо. Создать экспресс-методику *неразрушающего* оценивания технического состояния ХИТ в условиях существенной неопределенности на базе экспертных знаний.

Выбранное факторное пространство (задача класса А) включает следующие параметры: X_1 – продолжительность срока службы ХИТ, (количество циклов); X_2 – фактическая величина электрической емкости ХИТ; X_3 – величина сопротивления изоляции между электрическими цепями и корпусом батареи, электрическими цепями и цепями сигнализирующих устройств; X_4 – величина разбаланса энергетических характеристик между аккумуляторами в батарее; X_5 – состояние электрических цепей сигнализирующих датчиков (ДТЗ, ИКЗ); X_6 – режим эксплуатации; X_7 – наличие признаков разгерметизации (вздутие аккумуляторов, подтеки электролита), наличие признаков коррозии корпуса, нарушение лакокрасочного покрытия. Выходная переменная: Y – агрегированный (обобщенный) выходной параметр (показатель) состояния (ОПС) ХИТ.

На рисунке 14 показаны типичные кадры тепловизионной съемки для определения факторов X_2 и X_5 .

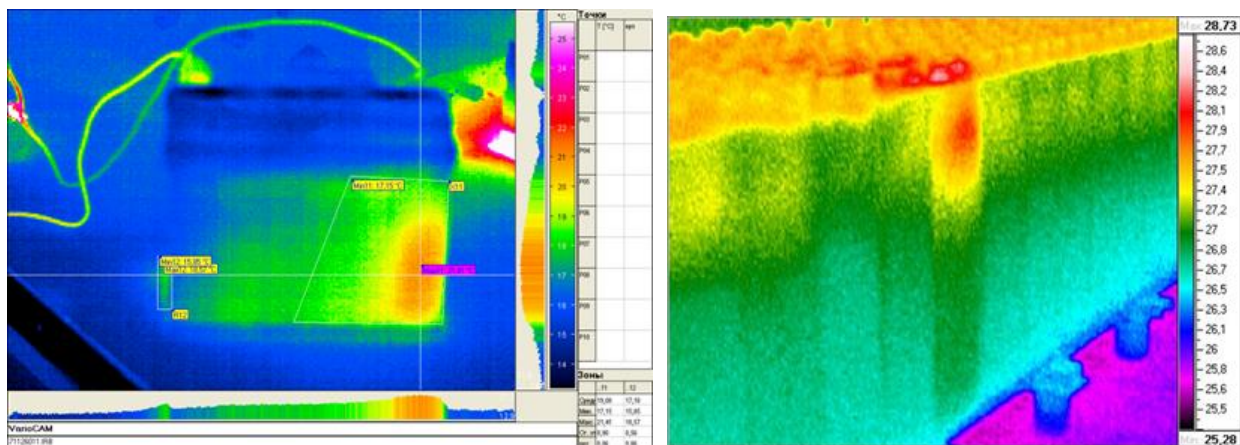


Рисунок 14 — Типичные кадры тепловизионной съемки для определения X_2 и X_5 :
слева – отдельный аккумулятор; справа – батарея аккумуляторов

Результирующее полиномиальное выражение со значимыми коэффициентами (задача класса В) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,416 + 0,0787x_1 + 0,1313x_2 + 0,0313x_4 + 0,102x_6 + 0,0948x_7 + 0,0154x_1x_4 - \\
 & 0,0106x_1x_5 - 0,0257x_1x_6 + 0,0105x_2x_5 - 0,0106x_3x_5 + 0,0107x_4x_6 + 0,0105x_4x_7 - \\
 & -0,0107x_1x_2x_7 + 0,0104x_1x_2x_6 - 0,011x_1x_2x_7 - 0,0106x_1x_3x_4 + 0,0154x_2x_4x_7 + \\
 & +0,0209x_3x_4x_5 + 0,0101x_3x_5x_6 - 0,0107x_3x_5x_7
 \end{aligned}$$

Адекватность полученного выражения подтверждена на основе оценки 30 ХИТ из статистических данных за несколько предшествующих лет. Все расчетные значения совпали с комиссионными оценками, полученными на основе опроса экспертов. Дополнительно получена *принципиально новая информация*, позволившая создать *методику оценивания и прогнозирования остаточного ресурса ХИТ* с использованием полученной модели, которая также далее использовалась при формировании соответствующей базы знаний (задача класса Г). Данная методика включает в себя следующие основные шаги:

Шаг 1. Рассчитывается *градиент* Y по фактическому состоянию СЛО на момент обследования:

$$\text{grad}(Y) = \sqrt{\sum (\partial Y / \partial x_i)^2} \quad (13)$$

Шаг 2. Вводится коэффициент относительного времени оставшегося ресурса τ_i для i -го случая в виде выражения:

$$\tau_i = (Y_i - Y_{\text{пред}}) / \text{grad}(Y_i) \quad (14)$$

где $Y_{\text{пред}}$ – значение состояния ХИТ, соответствующее переходу изделия в предельное состояние.

Шаг 3. Рассчитывается *прогнозируемый срок эксплуатации изделия* по формуле:

$$t_{\text{прогн}} = t_{\text{гар}} \tau_i^{\text{факт}} / \tau^{\text{гар}} \quad (15)$$

где $t_{\text{гар}}$ — гарантийный срок эксплуатации изделия; $\tau_i^{\text{факт}}$ — фактическое значение коэффициента относительного времени оставшегося ресурса на момент проведения обследования; $\tau^{\text{гар}}$ — значение коэффициента относительного времени оставшегося ресурса по гарантийным данным.

На рисунке 15 представлены результаты решения всех перечисленных ранее классов задач, связанных с оцениваем состоянием ХИТ.

Достигнутые результаты.

1. Разработана экспресс-методика *неразрушающего контроля* технического состояния ХИТ в условиях существенной неопределенности на базе экспертных знаний.

2. Полученные количественные оценки состояния ХИТ в многомерном пространстве позволяют проводить мониторинг изделий для выработки гибкой стратегии эксплуатации объектов исследования, а экспертным комиссиям повысить оперативность и объективность принятия решения по продлению срока службы ХИТ.

3. Результаты исследования легли в основу создания алгоритмического обеспечения интеллектуальной информационно-диагностической системы *количественного определения и прогнозирования остаточного ресурса ХИТ* (рисунок 15).

4. На «Способ неразрушающего контроля технического состояния химических источников тока» получен патент РФ № 2467436 от 20.11.2012.

Пример 3. Оценивание состояния пространственно-распределенного СЛО (рисунок 16).

Исходное состояние. Сложившее на предприятии критическое состояние вызвано введением водяного пылеулавливания (которое не предусмотрено первоначальным проектом), что инициировало разрушение дымовой трубы рассматриваемого металлургического предприятия (Медный завод, Норильск).

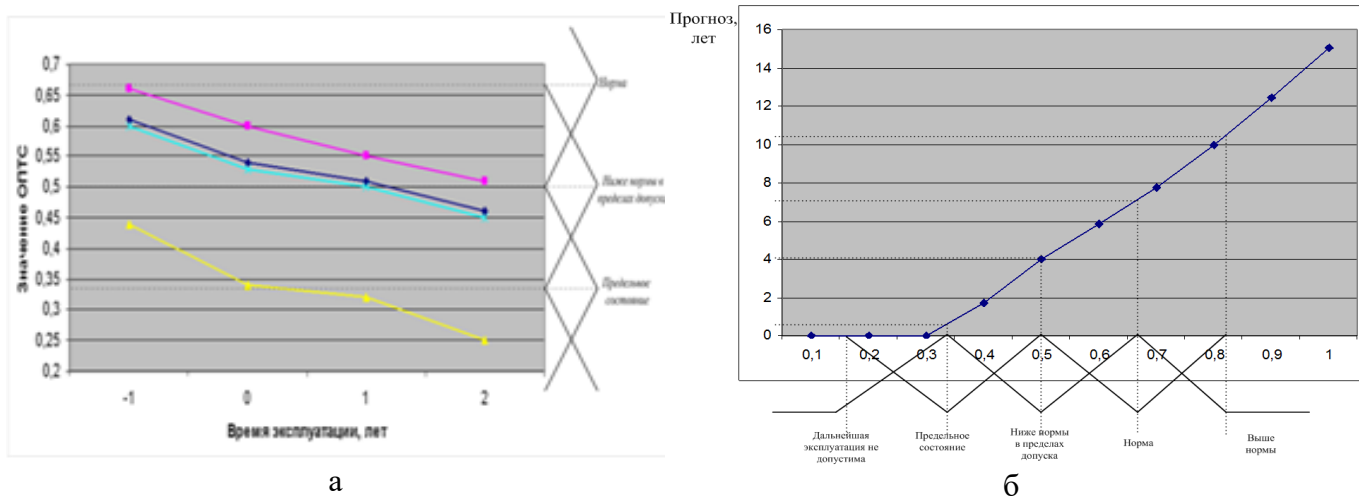


Рисунок 15 – Изменение состояния ХИТ (а) и прогнозируемого (б) остаточного ресурса (годы) от величины фактического значения состояния ХИТ



Рисунок 16 – Наблюдаемые дефекты: вертикальные трещины; деформация стяжных колец, разрушение оголовка

Необходимо. Создать модель для оценивания и прогнозирования состояния дымовой трубы металлургического завода для принятия эффективных инженерных и управленческих решений, связанных с продлением срока ее службы при условии обеспечения требуемого уровня безаварийной эксплуатации.

Выбранное экспертом факторное пространство включает в себя: Y – агрегированный (обобщенный) параметр (показатель) состояния элемента объекта, $[0,1]$; X_1 – уровень деформации стяжных колец (неколичественная переменная); X_2 – ширина раскрытия трещин (мм); X_3 – градиент раскрытия трещин (мм/год); X_4 – градиент изменения общего количества дефектов (неколичественная переменная); X_5 – материал наружной стенки ствола (неколичественная переменная).

Методика решения рассматриваемой задачи заключалась в следующем. Ствол дымовой трубы был разделен на равные по высоте элементы. Для каждого элемента дымовой трубы находилась количественная оценка его состояния по построенной полиномиальной модели. Объединение расчетных значений производилось путем графического

представления их функций отклика, распределенных по объему сооружения. Тренд изменения состояния дымовой трубы по годам показан на рисунке 17.

В результате применения разработанных в предыдущих главах методик получено полиномиальное выражение для оценки состояния элемента трубы, содержащее только значимые коэффициенты

$$Y = 0,469 - 0,063x_1 - 0,125x_2 - 0,156x_3 - 0,063x_4 + 0,063x_5 - \\ - 0,031x_2x_4 + 0,063x_3x_4 - 0,031x_2x_3x_4 \quad (16)$$

Рисунок 18 демонстрирует пример получения новой информации на основе построения и использования модели, а рисунок 19 – фрагмент мониторинга фактического и расчетного состояний дымовой трубы, а также результаты прогнозирования ее состояния на последующий период замера, иллюстрирующие изменение состояния данного СЛО в процессе его эксплуатации по годам.

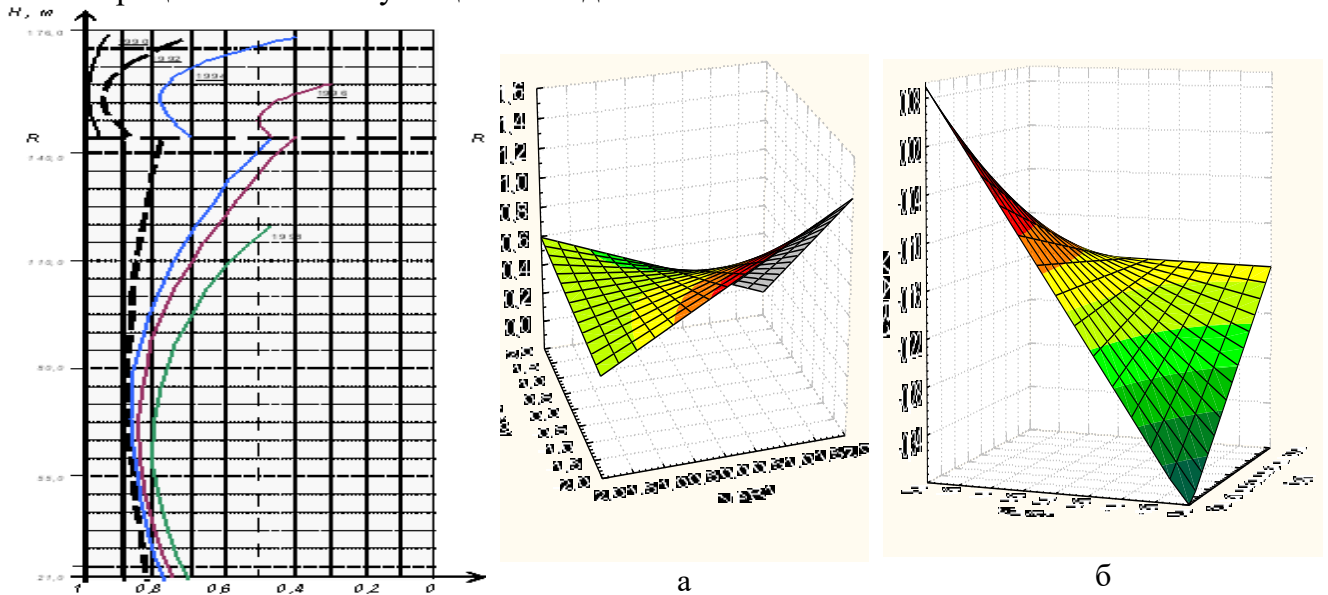


Рисунок 17 – Тренд состояния СЛО

Рисунок 18 – Визуализация функции отклика Y (а) и ее частной производной (б) в трехмерном пространстве

Состояние объекта	Расчет по модели	Прогноз на следующий год	Примечания
Нормальное эксплуатационное	0,962	Стабильное	
Стабильное	0,823	Нестабильное	
Нестабильное	0,706	Крайне нестабильное	
Крайне нестабильное	0,512	Аварийное	Отклонение верхней части ствола трубы от вертикальной оси в двух направлениях. Смещение оголовка
Аварийное	0,321	Естественное разрушение	Прогрессирующее развитие горизонтальной трещины на отм. 145.0м. Разрушение кладки оголовка.

Рисунок 19 – Прогнозные и фактические значения состояния объекта

Достигнутый результат.

На основе разработанного модельно-алгоритмического обеспечения проведено обоснованное оценивание и прогнозирование состояния дымовой трубы, что, в конечном, позволило принять своевременные инженерные и управленческие решения, свя-

занные с постепенным демонтажом верхней части трубы и продлить срок ее службы на 12 лет при отсутствии аварийных и чрезвычайных ситуаций.

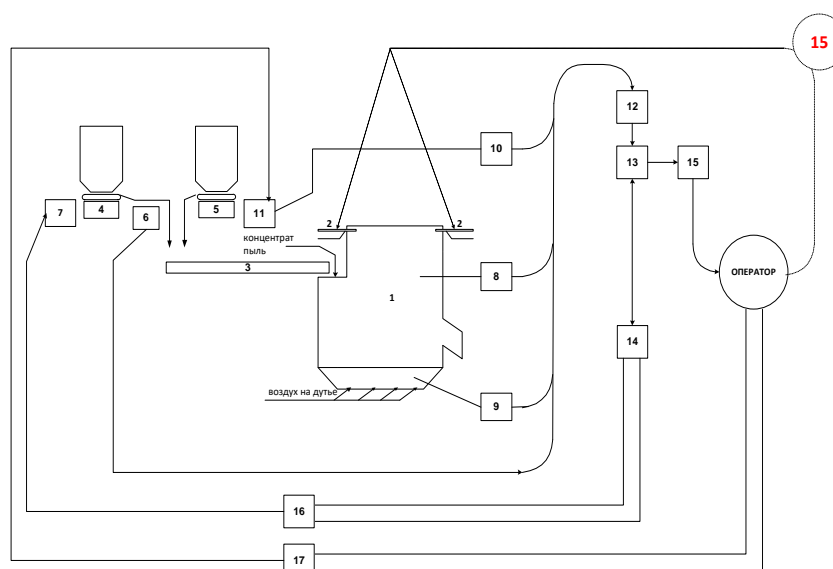
В шестой главе приведены результаты экспериментов по *многопараметрическому оцениванию состояния СЛО в динамических условиях*. Особое внимание уделено решению методологических и методических вопросов, учитывающих специфику функционирования СЛО в многомерных пространствах нечетких переменных. При этом с целью недопущения выхода параметров состояния СЛО за установленные пределы (или, по-другому, выхода реализуемого технологического процесса за регламентируемые пределы) динамика изменений данных параметров отслеживалась операторами и техническими средствами в режиме реального времени.

Пример 4. В данной главе диссертации была построена модель нечеткого логического регулятора (НЛР) с базой знаний, описывающей технологию интеллектуального управления металлургическим процессом (МП) в виде нечетких продукционных правил.

Исходное состояние: Известно исходное состояние, основные пространственно-временные, технические, технологические ограничения, определяющие специфику автоматизированного и операторного управления МП по данным АСУ процессом обжига в печи кипящего слоя.

Требуется: создать модель НЛР для автоматизации процесса управления МП с целью увеличения его производительности, а также и проактивного предупреждения и парирования аварийных ситуаций (рисунок 20).

Были выбраны следующие переменные факторного пространства: X_1 – скорость подачи концентрата, т/час; X_2 – скорость подачи пыли, т/час; X_3 – температура в реакционной зоне, °С; X_4 – grad T, °С/мин; X_5 – давление в рабочей камере, мм в ст; X_6 – время отслеживания процесса, мин; Y_1 – уставка скорости подачи концентрата, т/час; Y_2 – уставка скорости подачи пыли, т/час.



Структурная схема автоматического управления процессом обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя

Рисунок 20 – Структурная схема автоматического управления процессом обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя

На основе разработанной в 4 главе методики были получены две модели, описывающие данный технологический процесс с требуемой степенью адекватности:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 12,56 + 0,77x_1 + 1,31x_2 - 0,73x_1x_2 - 1,43x_6 - 1,15x_1x_6 - 2,1x_4 + 1,83x_1x_4 - \\
 & - 1,24x_2x_4 - 1,19x_1x_2x_4 - 0,53x_2x_4x_6 - 0,95x_3 + 1,12x_1x_3 - 1,72x_2x_3 - \\
 & - 0,72x_1x_2x_3 - 1,63x_2x_3x_6 - 1,22x_3x_4 - 1,23x_3x_4x_6 - 0,75x_2x_5 + 0,56x_5x_6 - \\
 & - 0,55x_1x_5x_6 - 0,9x_3x_5,
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$Y_2 = 4,8 + 1,4x_2 - 0,55x_6 - 0,52x_1x_2x_4 - 0,58x_1x_2x_3 - 0,55x_2x_3x_6. \tag{18}$$

В данных моделях представлены только значимые коэффициенты в стандартизованном масштабе. Проверка адекватности расчетов по управляющей модели проведена на основе данных, полученных в ходе оперативного контроля МП в течение 400 мин с уровнем квантования одна минута (рисунок 21).

Расчетные значения МП, полученные с помощью моделей (17)–(18), как следует из анализа рисунка 21, с достаточной степенью соответствия отслеживают логику действия оператора как относительно реакции на подъем температуры в реакционной зоне печи, так и относительно управления технологическим процессом в целом. При этом управление МП, на основе построенной модели, отражающей знания и опыт принятия решений лучшим обжигальщиком, более функционально в смысле увеличения производительности агрегата в целом на 25-30%.

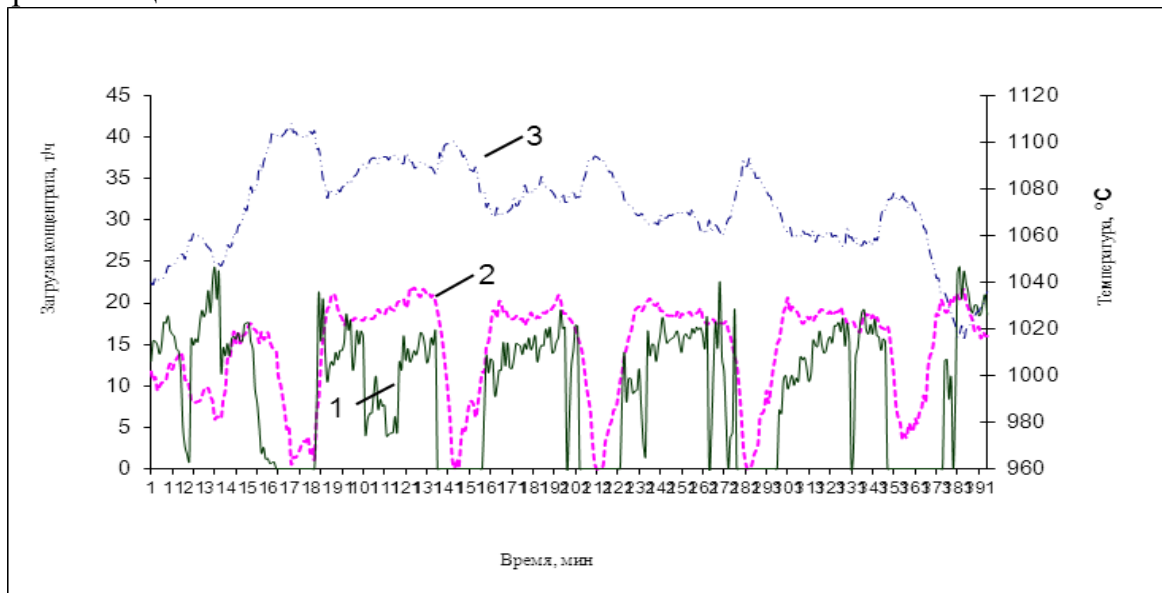


Рисунок 21 – Изменение загрузки концентрата в реакционную зону печи по времени: 1 – фактическая; 2 – расчетная по (17); 3 – изменение температуры в реакционной зоне

Полученные модели (17) и (18)

были использованы для построения базы знаний, описывающей специфику рассматриваемого МП и процессов управления им, а также для принятия решений при автоматическом управлении печью кипящего слоя (задачи класса Г) в различных ситуациях. Так, например, на рисунке 22 линия АВ на поверхности отклика модели управления обжигом в кипящем слое никелевого концентрата наглядно выделяет аварийные области, приближение к которым отслеживается в автоматическом режиме.

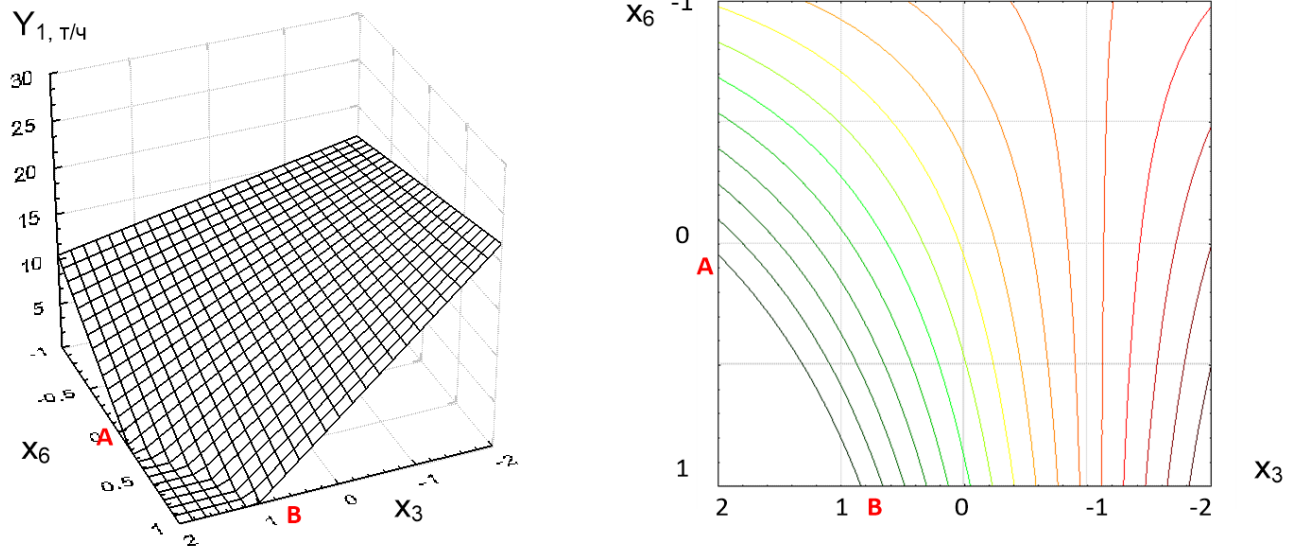


Рисунок 22 – Объемный и плоскостной портреты функции отклика:

Y_1 – скорость загрузки концентрата в печь кипящего слоя как функция температуры (x_3) и времени предыстории (x_6). Факторы x_1, x_2, x_4, x_5 равны +1. $Y_1 = 10,46 - 4,39x_3 - 3,1x_6 - 2,85x_3x_6$

Достигнутые результаты.

1. В результате реализации разработанного модельно-алгоритмического обеспечения повысилась производительность агрегата, обеспечивающего реализацию металлургического процесса (МП), на 25–30 %.
2. Повысилась безопасность ведения процесса за счет автоматического отслеживания событий, связанных с приближением МП к предаварийной области.
3. Получен патент РФ №2204616 на соответствующий способ автоматизации МП от 20.05.2003.

Пример 5. Синтез интеллектуальной автоматизированной системы управления (ИАСУ) сложным технологическим процессом.

Исходное состояние: Известно исходное состояние, основные пространственно-временные, технические, технологические ограничения, определяющие специфику автоматизированного и операторного управления процессом плавки (рисунок 23) в печи Ванюкова (ПВ) по данным АСУ ТП (Медный завод, «ГМК «Норильский никель»).

Требуется: создать интеллектуальную автоматизированную систему управления печью Ванюкова (ИАСУ ПВ) условиях существенной неопределенности на основе явных и неявных экспертных знаний.

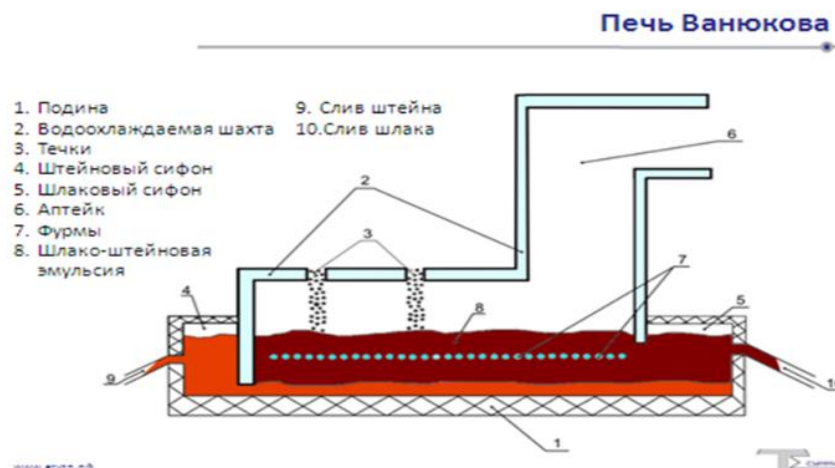


Рисунок 23 – Схема реализации процесса в печи Ванюкова

Для построения ИАСУ ПВ была выбрана методология управления рассматриваемым СлО, базирующаяся на «принципе разрешения конфликтов» – удержания процесса в рамках допустимой степени согласованности (рисунок 24).

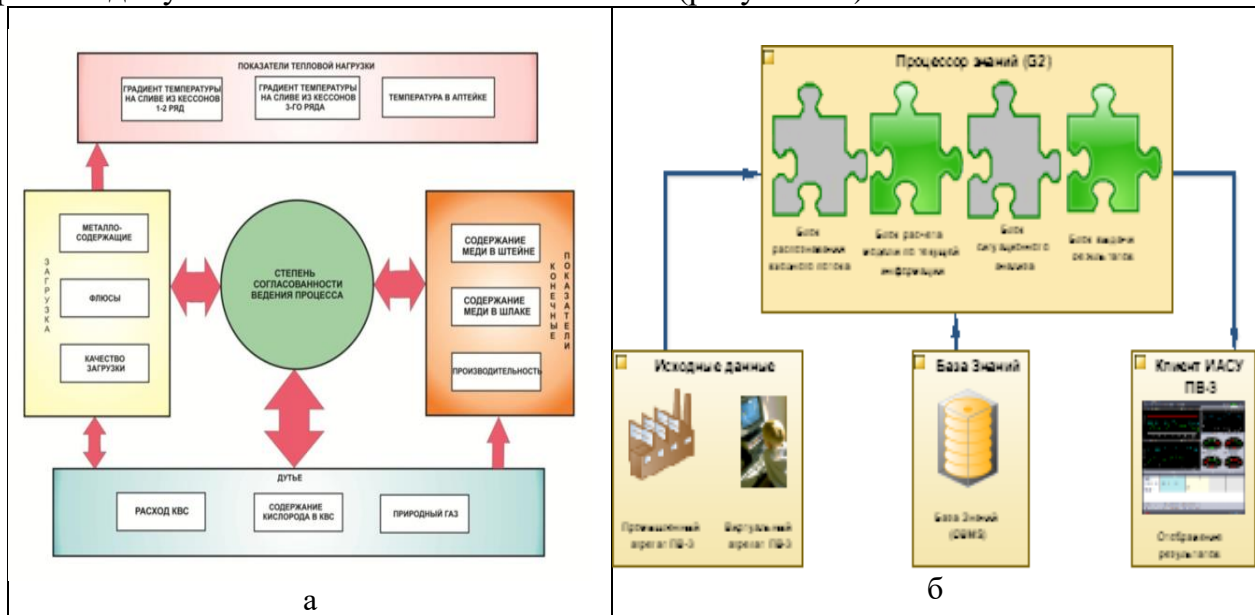


Рисунок 24 – Схема модели управления печи Ванюкова по степени согласованности процесса в целом (а) и общий вид архитектуры ИАСУ (б)

В ИАСУ ПВ на основе исходной информации, получаемой от АСУ ПВ и других информационных систем, в режиме реального времени проводятся расчеты текущего состояния процесса, анализируется наличие технологического дисбаланса (конфликта) и в случае идентификации конфликтных ситуаций оператору сообщаются предложения по сценариям разрешения конфликта. Предлагаемая ИАСУ ПВ выступает, таким образом, в роли «советчика оператору» и визуализирует информационные каналы, которые отображают для пользователя критерии степени сбалансированности технологического процесса.

В разработанной ИАСУ ПВ ситуационно используется более 10 нечетких моделей, описывающих технологический процесс разделительного плавления шихт в печи Ванюкова, построенных на основе более 20 лингвистических переменных, а также аналитические локальные модели работы по всей цепочке вспомогательных механизмов, обеспечивающих функционирование процесса Ванюкова в целом. Построенная таким образом «виртуальная печь» Ванюкова и работающая на той же информационной основе, что и промышленный образец, позволяет получать адекватные расчеты как по ведению процесса плавки, так и по качеству конечных продуктов плавки.

Методологическим новшеством является также построение аналитических моделей переменных процесса, которые не существовали в характеристиках процесса или объективно являлись неопределяемыми. К таким характеристикам относятся, например, степень согласованности процесса (Y_1) и температура ванны расплава (Y_8):

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 0,4383 - 0,0352x_1 - 0,1008x_2 - 0,0914x_3 - 0,0352x_4 - 0,0164x_5 + \\
 & + 0,0164x_1x_2 + 0,0258x_1x_3 + 0,0539x_2x_3 + 0,0164x_2x_4 + 0,0164x_2x_5 + \\
 & + 0,0258x_3x_4 + 0,0164x_3x_5 - 0,0164x_2x_3x_5,
 \end{aligned}
 \quad (19)$$

где в кодированном виде представлены: $x_1 = (X_1 - 5)/5$, где X_1 – отклонение загрузки флюсов от заданной нормы, т/ч; $x_2 = (X_2 - 6)/6$, где X_2 – нормированное отклонение удельного расхода кислорода на тонну МС, б/р; $x_3 = (X_3 - 5)/5$, где X_3 – отклонение

расчетного содержания меди в штейне от нормируемого, %; $x_4 = (X_4 - 0,6) / 0,2$, где X_4 – расчетное содержание меди в шлаке, %; $x_5 = (X_5 - 1340) / 40$, где X_5 – температура расплава, °С;

$$Y_8 = 1322,47 + 2,84x_{10} + 13,59x_{13} - 5,91x_{19} + 7,34x_7 + 5,09x_{10}x_{13} + 5,09x_{10}x_7 - 1,91x_{19}x_7 + 1,97x_{19}x_{20} + 1,97x_{10}x_{13}x_{19} - 1,91x_{10}x_{13}x_7, \quad (20)$$

где в кодированном виде представлены: $x_{10} = (X_{10} - 60) / 40$, где X_{10} – загрузка МС, т/ч; $x_{13} = (X_{13} - 200) / 50$, где X_{13} – удельный расход кислорода, м³/т; $x_{19} = (X_{19} - 0,15) / 0,15$, где X_{19} – доля инертных, б/р; $x_7 = (X_7 - 2400) / 1400$, где X_7 – расход природного газа, м³/ч; $x_{20} = (X_{20} - 10) / 10$, где X_{20} – влажность шихты, %; X_8 – температура расплава в реакционной зоне, °С (предполагается, что $X_5 = X_8$).

Модельно-алгоритмическое обеспечение ИАСУ ПВ позволяет выводить в реальном масштабе времени на АРМ оператора актуальную и важную информацию о состоянии рассматриваемого технологического процесса (рисунок 25).

Использование явных и неявных экспертных знаний применительно к оцениванию состояния конкретного СЛО, в данном случае процесса Ванюкова, осуществляется в условиях *соответствия технологическим регламентам* его функционирования, что *сводит к минимуму степень риска выработки системой неправильного решения, а мониторинг в режиме реального времени способствует раннему обнаружению приближения к запредельным (предаварийным) состояниям процесса.*

На рисунке 25 приняты следующие обозначения: 1 – изменение удельного расхода кислорода на тонну шихты; 2 – изменение содержания меди в штейне; 3 – изменение содержания диоксида кремния в шлаке; 4 – индикатор содержания меди в шлаке; 5 – % флюсов в загрузке; 6 – индикатор качества загрузки; 7 – индикатор температуры расплава; 8 – почасовая производительность по материалам загрузки; 9 – отражение наличия конфликта и его идентификация; 10 – корректировка удельного расхода кислорода; 11 – заливка конвертерного шлака.



Рисунок 25 – Интерфейс ИАСУ ПВ на АРМ оператора

Достигнутые результаты.

1. С использованием созданной ИАСУ ПВ была решена задача автоматического (автоматизированного) мониторинга и управления ПВ в «узком» коридоре изменения значений основных технологических параметров. При этом обеспечен требуемый уровень согласованности и реализуемости всех плановых заданий как по качеству конечных продуктов, так и по производительности ПВ.

2. Осуществлено полномасштабное промышленное внедрение ИАСУ ПВ на Медном заводе Заполярного филиала «ГМК «Норильский никель» (Норильск, 2013).

3. Фактически реализован наиболее общий подход к решению потоково-многоуровневого распознавания состояния и управления сложным технологическим процессом.

4. Получен патент РФ № 2 571 968 от 27.12.2015.

В заключении подведены итоги проведенного диссертационного исследования, сформулированы основные научные результаты и возможные направления дальнейшего развития полученных теоретических и прикладных результатов исследования.

Решена научная проблема разработки моделей и методов представления, формализации и использования явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния сложных объектов на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода. В рамках данного подхода предложено рассматривать эксперта как «интеллектуальную информационно-диагностическую систему», а также сохранять и тиражировать его умения, навыки, опыт и знания для решения задач оценивания состояния СЛО. Получены следующие научные результаты, составляющие итоги диссертационного исследования.

1. Проведенный системный анализ решаемой проблемы, который позволил на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода разработать концепцию оценивания состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний с использованием дополнительной неколичественной (вербальной) информации для построения математических моделей оценивания состояния СЛО.

2. Разработаны методологические и методические основы построения и использования нового класса математических моделей оценивания состояния СЛО, базирующихся на экспертных знаниях. При этом предложены: новые формы представления нечетких чисел, расширенные (с использованием методов символьной математики) и дополненные арифметическими действиями над ними для сохранения исходного уровня нечеткости явных и неявных знаний экспертов в условиях применения теории планирования экспериментов.

3. Разработан комбинированный метод построения моделей оценивания состояния СЛО как синтез современных методов инженерии знаний и методов теории планирования экспериментов, который позволил ввести новый класс моделей для оценивания и прогнозирования состояния СЛО в условиях существенной неопределенности.

4. Разработаны модели представления формализованного описания интуитивно-словесных и неявно заданных знаний эксперта о состоянии сложных объектов в аналитическом виде с учетом количественной и неколичественной (вербальной) экспертной информации.

5. Разработаны методика и критерии проверки адекватности и полезности синтезированных моделей оценивания состояния СЛО, различных по принадлежности, назначениям, конструктивным особенностям и условиям эксплуатации, функционирующих в условиях неопределенности. Данные критерии проверки предоставляют ЛПР возможность априорного оценивания несмещенности и эффективности получаемых с помощью полиномиальных моделей значений обобщенных параметров, характеризующих состояние СЛО.

6. С использованием разработанных методов, моделей и алгоритмов получены оценки фактического состояния широкого класса СЛО в различных областях науки и техники, что позволило оперативно и обоснованно принимать конкретные инженерные решения по оцениванию их состояния и прогнозированию рисков возможного разрушения, а также целесообразности дальнейшей эксплуатации указанных СЛО. Реализация результатов диссертационного исследования на практике осуществляется без больших затрат времени и ресурсов, и дает возможность сохранять и тиражировать знания и опыт высококвалифицированных специалистов в различных предметных областях.

Соответствие паспорта специальности 05.13.01 по областям исследований

1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

10. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах.

13. Методы получения, анализа и обработки экспертной информации.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы диссертационных исследований

Дальнейшие исследования по тематике диссертации целесообразно проводить в следующих направлениях:

- синтез оптимальных программ проактивного мониторинга и управления СЛО в различных условиях изменяющейся обстановки на основе интеграции вероятностно-статистического, нечетко-возможностного и интравального подходов к представлению и использованию имеющихся данных, информации и знаний;

- синтез системы извлечения и представления знаний эксперта для проведения комплексного моделирования и многовариантного многокритериального анализа различных сценариев реализации жизненных циклов рассматриваемых объектов как одного из этапов проактивного управления СЛО.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях ВАК

1. Дорошенко Н. И. Экспресс-методика оценки морфодинамических процессов в береговой зоне моря / Н.И. Дорошенко, Д.М. Белов, **А.В. Спесивцев** // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2018. №3(49). С. 547-554. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-547-554.

2. Тиличко, Ю.Н. Оценка воздействия природных и антропогенных рисков на кроилитозону для строительства зданий и сооружений в арктическом регионе / Ю.Н. Тиличко, **А.В. Спесивцев**, А.В. Вагин // Проблемы управления рисками в техносфере, №2[42], 2017. С. 14-21.

3. Гула, Д.Н. Оценивание состояния металлооблицовки стартовых сооружений ракетно-космических комплексов на основе логико-лингвистических моделей / Д.Н. Гула, **А.В. Спесивцев**, А.В. Вагин // Проблемы управления рисками в техносфере, №1[41], 2017. С. 26-34.

4. Астанков, А.М. Снижение рисков возникновения опасных последствий при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов / А.М. Астанков, **А.В. Спесивцев**, А.В. Вагин // Проблемы управления рисками в техносфере. 2016. №1[37]. С. 6-14.

5. **Спесивцев, А.В.** Интеллектуальная автоматизированная система управления процессом плавки ПВ-3 Медного завода ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» / А.В. Спесивцев, И.Н. Дайманд, В.И. Лазарев, А.П. Кащук // Известия вузов. Цветная металлургия. 2014. №5. С. 64 – 69.

6. **Спесивцев, А.В.** Критерий информативности полиномиальной модели на основе функций принадлежности специального типа / А.В. Спесивцев, А.В. Вагин // Проблемы управления рисками в техносфере, 2012. №5. С.16-23.

7. Кунько, А.Е. Оценивание технического состояния химических источников тока на основе неявных экспертных знаний / А.Е. Кунько, **А.В. Спесивцев** // Информация и космос. 2010. № 4. С. 42–49.

8. **Спесивцев, А.В.** Интеллектуальная экспертная система поддержки принятия решений в нечетких условиях конъюнктуры рынка / А.В. Спесивцев, Н.Ю. Уланова, А.В. Вагин // Проблемы управления рисками в техносфере. 2008. № 2. С.44–50.

9. **Спесивцев, А.В.** Прогнозирование аварийных ситуаций при эксплуатации технологических объектов на основе фаззи-моделей / А.В. Спесивцев, А.В. Вагин, И.П. Кардашев // Проблемы управления рисками в техносфере. 2008. № 4. С.14–19.

10. **Спесивцев, А.В.** Информационная модель нечеткого логического регулятора с интеллектуализированной базой знаний / А.В. Спесивцев, И.Т. Кимяев // Управление большими системами. Выпуск 21. – М.: ИПУ РАН, 2008. – С.165–172.

11. **Спесивцев, А.В.** Выбор достаточного количества коэффициентов аппроксимирующего полинома в нечетком многомерном факторном пространстве / А.В. Спесивцев, // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2008. №4. С.33–36.

12. **Спесивцев, А.В.** Интеллектуализация как путь повышения эффективности принятия решений в условиях неопределенности / Уланова Н.Ю., **А.В. Спесивцев**, Тропинов Ю.В. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. №4. С. 47–49.

13. **Спесивцев А.В.** Интеллектуализация системы принятия решений при оперативном управлении магистральным газопроводом / Н.Ю. Уланова, **А.В. Спесивцев**, Ю.В. Тропинов // Вестник ИрГТУ, № 2(30). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. С.122-128.

14. **Спесивцев, А.В.** К вопросу об управлении безопасностью и рисками в строительстве / А.В. Спесивцев, Кардашев И.П., Джаман А.М., Семенов Г.В. // Экономика и управление. 2005. №3. С. 98–103.

15. **Спесивцев, А.В.** Методика построения нечеткой управляющей модели процесса Ванюкова для безокислительной плавки сульфидных концентратов / З.Г. Салихов, **А.В. Спесивцев**, В.И. Лазарев, Н.И. Мищенко, Е.В. Навильников И.Т. Кимяев // Известия вузов. Цветная металлургия, 2002. №1. С.76 – 82.

16. Кимяев, И.Т. Исследование закритических областей факторного пространства при управлении обжигом в кипящем слое с помощью нечеткой управляющей модели / И.Т. Кимяев, **А.В. Спесивцев**, З.Г. Салихов, А.В. Дроздов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2001. № 1. С. 74–77.

17. **Спесивцев, А.В.** Управляющие модели металлургических процессов с использованием нечетких множеств / А.В. Спесивцев, А.В. Дроздов, С.В. Негрей, Р.Р. Даминов // Цветные металлы. 1996. №11. С. 66–69.

18. Дроздов, А.В. Формализация экспертной информации при логико-лингвистическом описании сложных систем / А.В. Дроздов, **А.В. Спесивцев** // Изв. РАН. Техническая кибернетика. 1994. № 2. С. 89–96.

Публикации в SCOPUS

19. Laishev, K., **Spesivtsev, A.**, Prokudin, A., Domshenko, N. 2018. Logical-linguistic model of anthrax epizootic monitoring in far north. *Engineering for Rural Development*, 17, pp. 205-209.

20. Popov, V.D., **Spesivtsev, A.V.**, Sukhoparov, A.I., Spesivtsev, V.A. 2017. Convolution of multi-criteria expert estimates in a context of uncertainty. *Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017*, pp. 203-206.

21. Briukhanov, A.Y., Trifanov, A.V., **Spesivtsev, A.V.**, Uvarov, R.A., Spesivtsev, V.A. 2017. Logical-linguistic model of farm organic waste recycling. *Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017*, pp. 265-267.

22. Uvarov, R., Briukhanov, A., **Spesivtsev, A.**, Spesivtsev, V. 2017. Mathematical model and operation modes of drum-type biofermenter. *Engineering for Rural Development*, 16, pp. 1006-1011.

23. Ignatyev, M., Marley, V., Mikhailov, V., **Spesivtsev, A.** 2016. Multi-model approach to city governance in the face of uncertainty. *Communications in Computer and Information Science. Digital Transformation and Global Society. First International Conference, DTGS 2016*, pp. 469-477.

24. Popov, V.D., **Spesivtsev, A.V.**, Sukhoparov, A.I., Spesivtsev, V.A. 2016. Use of logical-linguistic models to predict the retained biological potential of grasses during their conservation. *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016, Revised Selected Papers*, pp. 244-246.

25. **Spesivtsev, A.V.**, Dudorova, M.L. 2011. Multimodel approach to calculating material balances of an enterprise in the medium of intellectual data-measuring systems, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 52(2), pp. 191-195.

26. Drozdov, A.V., **Spesivtsev, A.V.** 1995. Formalization of expert information in the logical-linguistic description of complex systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 33(4), pp. 76-83.

Патенты и свидетельства

27. Типаев, В.В. Способ количественного оценивания степени развития дефектов при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов / В.В. Типаев, А.М. Астанков, **А.В. Спесивцев**, Н.С. Демидова // Патент РФ № 2673629 от 28 ноября 2018 г.

28. Орешкин, С.А. Способ автоматического управления процессом плавки медно-никелевого сульфидного сырья в печи Ванюкова при переработке сульфидной шихты на штейн / С.А. Орешкин, **А.В. Спесивцев**, В.Г. Козловский, В.И. Лазарев, А.П. Кащук // Патент РФ № 2571968 Бюл. № 36 от 27.12.2015 г.

29. **Спесивцев, А.В.** Интеллектуальная программа оптимального управления печью Ванюкова / А.В. Спесивцев, И.Н. Дайманд, А.В. Филатов, Д.С. Негрей, С.В. Летуновский // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014613676 от 02 апреля 2014 г.

30. **Спесивцев, А.В.** Создание логико-лингвистических моделей на базе неявных экспертных знаний / А.В. Спесивцев, В.А. Спесивцев // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014610613 от 15 января 2014 г.

31. Кунько, А.Е. Способ неразрушающего контроля технического состояния химических источников тока / А.Е. Кунько, **А.В. Спесивцев** // Патент РФ 2467436. Бюлл. № 32, 20.11.2012 г.

32. Салихов, З.Г. Способ автоматического управления обжигом никелевого концентрата в печи кипящего слоя / З.Г. Салихов, **А.В. Спесивцев**, А.В. Дроздов, И.Т. Кимяев, В.Г. Степин // Патент РФ № 2204616 От 20.05.2003 г.

Монографии

33. Игнатъев М.Б. Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний / М.Б. Игнатъев, В.Е. Марлей, В.В. Михайлов, **А.В. Спесивцев** // СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – 430 с.

34. **Спесивцев, А.В.** Мягкие измерения и мягкие вычисления при моделировании состояния сложных объектов на базе экспертных знаний/ В книге «Управление в условиях неопределенности: монография» / Под общ. ред. проф. С.В. Прокопчиной. // СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017, 304 с. – С.217-263.

35. **Спесивцев, А.В.** Метод извлечения и формализации экспертной информации / С.В. Прокопчина, М.Ю. Шестопапов, Л.В. Уткин, М.С. Куприянов, В.Л. Лазарев, Д.Х. Имаев, В.Л. Горохов, Ю.А. Жук, А.В. Спесивцев // Управление в условиях неопределенности: Монография. Под общ. ред. проф. С.В. Прокопчиной. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 304 с. – С.217-263.

36. **Спесивцев, А.В.** Управление рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации. Под ред. проф. В.С. Артамонова / А.В. Спесивцев. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 238 с.

37. **Спесивцев, А.В.** Металлургический процесс как объект изучения: новые концепции, системность, практика / А.В. Спесивцев. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 307 с.

38. Артамонов, В.С. Элементы превентивного управления рисками при эксплуатации системных объектов. Под общей редакцией **А.В. Спесивцева** /Артамонов В.С., Кардашев И.П., Моторин В.Б., **А.В. Спесивцев**, Уткин Н.И. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2003 – 132 с.

В других изданиях

39. **Спесивцев, А.В.** Оценивание информативности полиномиальной модели функциями принадлежности специального типа // Сб. докладов. XIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 23-25 июля 2010, Санкт-Петербург, 2010, Т.1. – С.110-113.

40. **Спесивцев, А.В.** Интеллектуальная АСУ печи Ванюкова. // Control Engineering Россия, Август 2013, №4 (46). – С. 86-91.

41. **Спесивцев, А.В.** Структурно-топологическая архитектура экспертной системы оценивания технологического объекта при полимодельном логико-лингвистическом подходе// Сб. докладов. XVIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2015, 19-21 мая 2015, Санкт-Петербург, 2015. Т1 – С.117-123.