

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

На правах рукописи



КОЖУХИН ИГОРЬ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**Методы и алгоритмы построения базы знаний системы защиты  
оптико-электронной аппаратуры от антропогенных частиц**

Специальность 05.13.01 –  
«Системный анализ, управление и обработка информации  
(в промышленности)»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Кемайкин В.К.

Тверь - 2019

**Оглавление**

Введение .....	4
Глава 1. Анализ практики применения интеллектуальных средств в обеспечении безопасности оптико-электронных систем при воздействии антропогенных частиц. Постановка научной задачи .....	16
1.1. Анализ существующей системы предупреждения об опасных ситуациях и меры по защите оптико-электронных систем от воздействия антропогенных частиц .....	16
1.2. Анализ применимости математических моделей и методов, используемых для прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц .....	25
1.3. Анализ существующих способов построения баз знаний интеллектуальных систем прогнозирования .....	34
1.4. Постановка научной задачи. Выводы по главе .....	50
Глава 2. Методика построения базы знаний комплексной интеллектуальной информационной системы по защите от антропогенных частиц .....	54
2.1. Обоснование модели знаний по защите от антропогенных частиц .....	54
2.2. Алгоритм обучения базы знаний прогнозированию результатов воздействия антропогенных частиц .....	62
2.3. Оценка результатов обучения базы знаний прогнозированию результатов воздействия антропогенных частиц .....	71
2.4. Формализация параметров оценки барьера безопасности при воздействии антропогенных частиц .....	73
2.5. Алгоритм оценки эффективности барьера безопасности при воздействии антропогенных частиц .....	79
2.6. Обоснование структуры и содержание методики построения базы знаний комплексной интеллектуальной информационной системы по защите от антропогенных частиц .....	85
Выводы по главе .....	92

Глава 3. Экспериментальное исследование методики построения базы знаний комплексной интеллектуальной информационной системы защиты от антропогенных частиц.....	97
3.1. Система «БЛИЦ».....	97
3.2 Анализ применимости алгоритма обучения базы знаний прогнозированию условий и результатов воздействия антропогенных частиц.....	105
3.3 Реализация алгоритм оценки эффективности и выбора барьера безопасности при защите от антропогенных частиц.....	117
3.4. Оценка результатов реализации методики построения базы знаний комплексной интеллектуальной информационной системы защиты от антропогенных частиц .....	122
3.5. Расчет живучести автономного функционирования оптико-электронной системы методом структурно-логических схем .....	125
Выводы по главе.....	129
Заключение .....	131
Список литературы .....	136
Приложение 1 .....	146
Приложение 2 .....	163
Приложение 3 .....	183
Приложение 4 .....	184

## Введение

Космическая промышленность имеет для России стратегическое значение. Её развитие необходимо для укрепления обороноспособности, национальной безопасности России, для повышения научного потенциала и создания инновационных производств. Исследование и освоение космоса, использование новых возможностей в интересах экономики, социальной сферы являются важнейшим направлением технологического прорыва России. Ключевую роль в этом возлагается на наращивание орбитальной группировки космических аппаратов (КА) различных типов и назначения.

Функционирование КА на орбите осуществляется в условиях воздействия большого количества факторов имеющих внешнюю и внутреннюю природу. Среди них выделяются механические опасности, характеризующиеся опасностью механических (в том числе метеоритных) воздействий, основным из которых являются антропогенные частицы (АЧ).

Научно-техническим подкомитетом комитета Организации Объединенных Наций (ООН) по использованию космического пространства в мирных целях было утверждено следующее понятие космического мусора: «Космический мусор – все находящиеся на околоземной орбите или возвращающиеся в атмосферу антропогенные объекты, включая их фрагменты и элементы, которые являются нефункциональными».

Практика управления КА показывает, что аппараты, функционирующие на орбитах со средними высотами ~ 400÷600 км, ежемесячно по 5-8 раз сближаются с АЧ на расстояния до 15 км. Аппараты, движущиеся на высотах 600-700 км, ежемесячно сближаются до указанного расстояния по 8-12 раз, а КА с высотами орбит 700-900 км – по 12-16 раз.

Это обстоятельство выдвигает на первый план проблему обеспечения безопасности пилотируемых и автоматических КА. Несмотря на большое внимание, уделяемое этой проблеме во многих странах, остается ряд нерешенных вопросов, требующих проведения дополнительных исследований. К ним, в частности относятся: наблюдение малоразмерных

АЧ, которые фактически невозможно обнаружить радиолокационными и оптическими средствами наземного базирования, прогнозирование опасности указанных объектов по возможности столкновения и повреждения КА, своевременное принятие адекватных мер по снижению риска нарушения функционирования и существования автономных КА [1].

Основными недостатками существующих средств обеспечение наблюдения и защиты КА от воздействия АЧ являются:

1. Ограничения по размерам обнаруживаемых и сопровождаемых частиц. В каталоге Центра контроля космического пространства России фиксируются объекты с размером более 10 см, в перспективе, к 2025 года – более 7 см.

2. Ограничения по времени подготовки и выдаче на борт команд и (или) программ управления для подключения барьера безопасности. Реализованные на борту аварийные программы срабатывают по логическому выводу результатов обработки контролируемых параметров технического состояния КА и призваны повысить безотказность КА. Задержка в выдаче команда управления по обнаруженным опасным КО составляет до 28,5 часов.

3. Ограничения по перечню применяемых барьеров безопасности при воздействии АЧ. Эффективных средств защиты от АЧ размером в поперечнике более 1 см практически нет. Единственной действенной мерой является выполнение маневра уклонения, который выполняется каждый раз, когда расстояние сближения с КА, менее заданного  $\Delta$ , либо сближение на большее расстояние с вероятностью столкновения  $p_c$  большей порога  $p_{min}$ .

4. Барьеры безопасности, реализованные на КА в виде функций, изделий, материалов, программного обеспечения и т. д., созданные с целью предотвращения, остановки или замедления развития опасной ситуации не имеют механизма уточнения эффективности в сложившихся условиях при угрозе воздействия АЧ.

Разработанные в [2] предложения по размещению на борту КА оптико-электронной аппаратуры и реализация алгоритмов обнаружения мелких и средних АЧ, потребовали разрешения задач прогнозирования результатов воздействия АЧ на КА, оценки и подключения эффективных барьеров безопасности с целью повышения живучести КА. Решение указанных задач особенно важно для автономного режима функционирования КА.

Автономность (функционирования) КА - способность выполнять целевые задачи с заданным уровнем эффективности без связи с наземным комплексом управления КА и без пополнения с Земли расходуемых бортовых ресурсов в течение определенного временного интервала. Непосредственной мерой степени автономности является промежуток времени, в течение которого КА находится в состоянии автономного функционирования. Этот интервал колеблется от нескольких часов до нескольких суток.

Повышение автономности КА связано с передачей отдельных функций управления на борт КА, а значит и более высокой степенью автоматизации процесса управления.

В этом контексте автономность имеет комплексный характер, что предопределяет проведение исследований по ряду направлений: создание эффективных бортовых измерительных средств, расширение каталога потенциально опасных объектов, проектирование высокоинформативных бортовых вычислительных машин и др.

Одним из направлений является разработка и внедрение в состав бортовых средств КА комплексной интеллектуальной информационной системы (КИИС) нового поколения – «умной» автоматизации, которая в автоматическом режиме позволит решать задачи прогнозирования повреждений КА при возможном воздействии АЧ и своевременное подключения эффективного барьера безопасности используя модели, основанные на знаниях. Указанный аппаратно-программный комплекс

обеспечит устойчивое управление, повысит уровень автоматизации решения задач, возникающих при длительных орбитальных полетах в условиях быстроменяющейся обстановки.

Результатом работы такой системы является формируемый сигнал управления, по которому будет автоматически задействован барьер безопасности, эффективный в текущей ситуации. Подключение барьера безопасности требует ресурса по времени, топливу и определяется его надежностью, при этом имеется множество альтернативных барьеров. Появляется возможность оптимизации управления КА по обеспечению безопасности при воздействии АЧ.

При угрозе столкновения наиболее сложным оказывается спрогнозировать результат воздействия АЧ. Неопределенности, связанные с погрешностями измерения траекторных и не траекторных параметров взаимного движения КА и АЧ приводят к неоднозначным оценкам, особенно для мелкого и среднего АЧ.

Только эффективная КИИС способна обеспечить качественное управление КА, чем, собственно, и обусловлено опосредованное ее влияние на повышение живучести КА и недопущение снижения эффективности по причине подключения барьеров безопасности неадекватных складывающейся ситуации.

В тоже время КИИС манипулирует (как и система управления в целом) условными сигналами о складывающейся ситуации и ее математическими моделями. Поэтому возможности КИИС непосредственно определяются свойствами базы знаний (БЗ), которая является носителем модели оценки и прогнозирования, определяет достоверность получаемой информации об условиях взаимодействия КА и АЧ. Отмеченные обстоятельства предопределили актуальность и практическую направленность проведенных в диссертации исследований.

В диссертации исследуются методологические вопросы построения БЗ КИИС, методов и алгоритмов прогнозирования результатов воздействия АЧ

и автоматического подключения барьеров безопасности, адекватных складывающимся условиям.

Цель исследования: повышение живучести автономного функционирования КА на основе разработки и внедрения в состав бортовых средств базы знаний (БЗ) комплексной интеллектуальной системы (КИИС) защиты от антропогенных частиц.

Объектом исследования является безопасность КА при воздействии антропогенных частиц.

Предметом исследования являются методы прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц, оценки и выбора барьера безопасности КА при угрозе столкновения.

Анализ литературы, опыт разработок [3, 4, 5, 6] показывает, что вопросы проектирования БЗ напрямую связаны с получением знаний из различных источников, структуризацией (концептуализацией) и формализацией, позволяющей просто и наглядно представлять их в виде пригодном для использования на ЭВМ.

Вопросам построения БЗ и их использования для автономного функционирования объектов посвящен ряд работ, например [7, 8, 9].

Однако в этих работах не рассмотрены следующие важные вопросы.

Главным недостатком продукционной БЗ является принцип ее работы по «образцу», когда для вхождения задачу осуществляется поиск правила с требуемой условной частью. Если такое правило найдено, задача решается. Т.е. требуется полная информация о системе. Использование нечетких знаний позволяет избежать ограничений, присущих классической продукционной БЗ, но встает вопрос повышение точности результатов нечеткого логического вывода, что требует:

1. Проведение настройки (обучение) БЗ имеющимися данными по испытаниям и моделированию, чтобы в дальнейшем КИИС не ошибалась при оценке угрозы для КА. В существующих методиках решение этой задачи предполагалось проводить с привлечением экспертов, путем



корректировки коэффициентов и проведения верификации моделей, что существенно повышает затраты на эксплуатацию КИИС. Необходима автоматизация обучения нечеткой БЗ по примерам.

2. Уточнения (пересчета) эффективности барьеров безопасности КА с учетом текущих условий обстановки. В существующих методиках оценка эффективности барьера проводится заблаговременно, эксперты формируют варианты, и их последующая корректировка не предусматривается. Необходима возможность автоматического учета отличий прогнозируемых и текущих условий при реализации способа защиты КА.

В целом данный процесс в диссертации предложено называть обучением БЗ по изменениям в предметной области.

Таким образом, задача построения методики построения БЗ на основе методов и алгоритмов прогнозирования результатов воздействия АЧ, выбора барьера безопасности и автоматизации ее обучения по изменениям в предметной области является актуальной темой диссертационной работы.

Исследования проводились с учетом перспектив создания и развития «Автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве», шифр «АСПОС ОКП – 2025», до 2025 года.

Особое внимание уделено вопросам автоматического решения центральных задач управления при возможном воздействии объектов АЧ на КА: прогнозированию результатов воздействия и выбору рационального способа (барьера) обеспечения безопасности КА с учетом текущих условий обстановки.

Для достижения цели исследования поставлены и решены следующие частные задачи:

- проведен анализ существующих средств и способов обнаружения объектов АЧ и управления КА при возможных столкновениях и сформулирована прагматическая проблема обеспечения безопасности КА в полете;

- проведен анализ известных методов оценки прогнозирования результатов воздействия АЧ и обеспечения безопасности КА в различных условиях обстановки. Обоснованы направления их дальнейшего совершенствования.

- сформулирована научная задача исследования по разработке методики построения БЗ КИИС на основе формализации процесса построения барьера безопасности КА с использованием математических моделей и алгоритмов прогнозирования результатов воздействия АЧ и оценки эффективности барьера КА в конкретных условиях обстановки;

- разработана модель знаний по обеспечению безопасности КА при возможном воздействии АЧ;

- разработана математическая модель и алгоритм прогнозирования результатов воздействия АЧ;

- разработан алгоритм обучения БЗ КИИС по прогнозированию условий и результатов воздействия АЧ;

- разработана математическая модель и алгоритм оценки эффективности барьера безопасности КА с учетом складывающейся обстановки при воздействии АЧ;

- разработана методика построения БЗ КИИС защиты от АЧ;

- разработана программная реализация разработанных моделей и алгоритмов построения БЗ КИИС защиты от АЧ;

- проведены экспериментальные исследования предложенных алгоритмов с целью оценки достоверности получаемых результатов.

Научная новизна заключается в разработке методики построения БЗ КИИС защиты от АЧ, позволяющей, в отличие от известных проводить ее автоматическую настройку на изменения в предметной области воздействия антропогенных частиц, прогнозировать условия и результаты такого воздействия, а также автоматически оценивать эффективность и проводить выбор барьера безопасности КА с учетом условий обстановки,

определяемых важностью параметров барьера. В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Обоснована целесообразность и сформулирована научная задача построения методики построения БЗ КИИС защиты от антропогенных частиц.

2. Формализовано описание процесса обеспечения безопасности КА и разработана модель знаний по прогнозированию результатов воздействия антропогенных частиц.

3. Разработан алгоритм обучения базы знаний по прогнозированию результатов воздействия антропогенных частиц.

4. Разработан алгоритм оценки эффективности барьера безопасности от антропогенных частиц с учетом условий обстановки.

5. Разработана и реализована в виде программных средств методика построения БЗ КИИС по защите от антропогенных частиц.

Практическая ценность работы заключается в возможности использования методики для расширения функционала аппаратно-программных средств КА на этапе разработки и производства. Применение разработанных алгоритмов прогнозирования результатов воздействия АЧ антропогенных частиц, оценки и выбора барьера безопасности КА в составе бортовых аппаратно-программных комплексов и их реализация в цикле работы бортовой ЭВМ позволит решать задачу обеспечения безопасности КА в автоматическом режиме.

Результаты диссертационной работы были успешно внедрены на предприятии ОПК - АО «РТИС ВКО». Акт прилагается.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы общенаучные методы: формализация, моделирование, анализ и синтез, а также специальные математические методы теории искусственного интеллекта, нечетких множеств, машинного обучения, экспертных оценок.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель знаний по обеспечению безопасности КА при воздействии АЧ, построенная на основе гибридного продукционно-сетевого формализма в виде семантической нейро-нечеткой сети. Модель знаний позволяет, в отличие от известных, использовать знания на естественном языке и проводить обучение в масштабе времени, близком к реальному.

2. Методика построения БЗ КИИС, которая обеспечивает введение основных формализмов, необходимых для прогнозирования условий и результатов воздействия антропогенных частиц и оценки эффективности барьеров безопасности на всем множестве альтернативных мер по защите КА, а также проведение в автоматическом режиме обучения базы знаний для учета изменений в предметной области (условий воздействия антропогенных частиц и важности параметров барьера безопасности).

Прогноз результатов воздействия осуществляется с использованием ограниченного множества экспериментальных исследований и моделирования процессов и распространяется на все множество параметров оценки взаимодействия. Прогноз условий воздействия осуществляется на основе обратного вывода, позволяющего определять возможные сочетания значений входных параметров из множества допустимых, соответствующих конкретному повреждению.

Оценка эффективности барьера безопасности проводится на основе принципа гарантированного результата, в автоматическом режиме с учетом существующих ресурсных ограничений по надежности, располагаемому времени и расходу топлива на реализацию защиты.

Использование методики позволяет провести построение БЗ КИИС по защите, спрогнозировать результат воздействия антропогенных частиц и выбор рационального барьера безопасности с учетом отличии прогнозируемых и текущих условий обстановки, что позволяет повысить живучесть автономного функционирования КА в условиях воздействия антропогенных частиц.

Достоверность результатов исследования обеспечивается использованием реальных данных по испытаниям материалов КА, а также обоснованным применением общих и специальных методов исследований, корректностью применяемого математического аппарата. Корректность теоретических закономерностей и решений проверялась в ходе вычислительных экспериментов, практического применения полученных результатов в условиях реальной проектной деятельности и подтверждается сходимостью с известными результатами экспериментов и моделирования, полученных в проводимых исследованиях.

Апробация результатов работы. Основные теоретические положения и научные результаты докладывались на конференциях:

«Искусственный интеллект: проблемы и пути их решения – 2018», г. Кубинка, КВЦ «Патриот», 2018

3-й Международной научной конференции «Интеллектуальные информационные технологии в технике и на производстве», г. Сочи, Россия, 2018

VI Всероссийской научно-технической конференции «РТИ Системы ВКО-2018», г. Москва, 2018.

2-й научно-практического семинара «Золотовские чтения», ТвГТУ, Тверь, 2018

Результаты исследований опубликованы в материалах 2 НИР: «Теория и адаптивные алгоритмы обнаружения антропогенных частиц и объектов и оценка их динамического взаимодействия с космическими аппаратами на основе интеллектуального анализа данных Шифр «2.1777.2018/ПЧ» и «Модели и методика для прогнозирования условий и результатов воздействия космического мусора на космический аппарат с использованием теории нечётких множеств и искусственных нейронных сетей».

Объем и структура работы.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и приложений.

Содержание глав изложено в последовательности, обеспечивающей их логическую взаимосвязь. Каждая глава заканчивается соответствующими выводами. Работа изложена на 184 листах, из них: приложения - 39 листов, список литературы и содержание - 16 листов. В списке использованной литературы 97 наименований.

Во введении обоснована актуальность исследования, определены его объект и предмет, научная проблема, цель и задачи, а также дано краткое изложение основных результатов исследования по главам и общая характеристика диссертационного исследования.

В первой главе проведен анализ объекта и предмета исследования. Показано, что основой безопасного автономного функционирования КА в условиях возможного воздействия АЧ является вариантный подход основанный на использовании барьеров безопасности, которые подключаются при угрозе воздействия АЧ. Сделан вывод о необходимости внедрения комплексной интеллектуальной информационной системы. Проведена оценка известных математических методов построения интеллектуальных систем и их основного элемента базы знаний, показана необходимость построения БЗ на основе теории нечеткой логики. Поставлена общая и частные задачи исследования.

Во второй главе обоснована структура и содержание методики построения БЗ КИИС. В основу методики положена разработка модели знаний по обеспечению безопасности КА, которая обеспечивает прогнозирование результатов воздействия АЧ, оценку эффективности и выбор барьера безопасности. Разработан алгоритм прогнозирования результатов воздействия АЧ, который основан на логико-лингвистическом подходе описания процесса прогнозирования с использованием базы знаний. Разработан алгоритм обучения БЗ прогнозированию условий и результатов воздействия АЧ на КА, который основан на настройке нейро-нечеткой сети с использованием двойственной сети методом обратного распространения ошибки.

Определен этап формализации экспертных оценок альтернативных барьеров безопасности в виде нечетких множеств с использованием лингвистических переменных.

Разработан алгоритм оценки эффективности и выбора барьера безопасности КА, позволяющий автоматически определять количественно обоснованный барьер с учетом условий обстановки, непосредственно при угрозе воздействия АЧ.

В третьей главе описана программная оболочка, реализующая разработанные модели и алгоритмы, проведено экспериментальное исследование методики построения БЗ КИИС и представлены результаты ее применения к ситуации возможного повреждения стенки КА, а также проведена оценка ее эффективности.

В заключении изложены основные результаты диссертации.

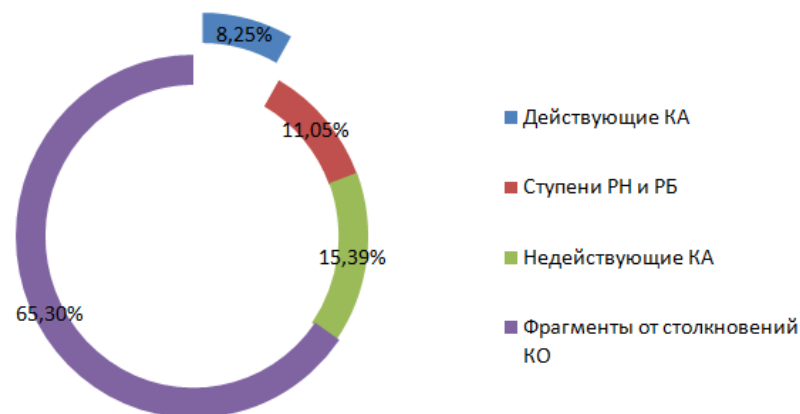
В приложениях представлены данные экспериментальных исследований, проводимых в рамках подготовки диссертации и сведения о внедрении полученных в ней результатов.

Таким образом, во введении обоснована актуальность исследования, определены его объект и предмет, сформулирована прагматическая проблема, цель и задачи исследования, а также дано краткое изложение основных результатов исследования по главам и общая характеристика диссертационной работы.

## Глава 1. Анализ практики применения интеллектуальных средств в обеспечении безопасности оптико-электронных систем при воздействии антропогенных частиц. Постановка научной задачи

### 1.1. Анализ существующей системы предупреждения об опасных ситуациях и меры по защите оптико-электронных систем от воздействия антропогенных частиц

В околоземном космическом пространстве находится большое количество неуправляемых объектов различного размера (от десятков метров до нескольких микрон). Они включают отработавшие назначенное время КА, части ступеней и разгонных блоков ракетносителей, фрагменты разрушенных корпусов, образовавшиеся в результате столкновений или взрывов космических объектов. Соотношение космических объектов по их типу представлено на диаграмме, все они являются по своей природе антропогенными частицами (АЧ):



Результаты космических наблюдений и их статистическая обработка показывает, что масса находящихся на орбитах антропогенных частиц превышает три тысячи тонн. При этом выделяют каталогизированные объекты размером более 10 см, которые составляют около 0,5% от общего числа и свыше 99% по массе и не каталогизированные составляющие более 99% по количеству и менее 1% по массе всех АЧ в околоземном пространстве



Движение частиц в пространстве происходит в диапазоне космических скоростей, а их взаимное перемещение может достигать значения до 15 км/с. Основная доля указанной массы содержится в более трех тысяч последних ступеней ракет, неактивных космических аппаратах и сравнительно небольшом числе активных объектах космической техники. Все они являются наблюдаемыми космическими объектами.

Меньшее количество массы (примерно сорок тонн) сосредоточено в четырех тысячах объектах, которые возникли в результате разрушений более крупных объектов на орбите или катастрофических отказов КА, при которых аппараты отделились от ракет-носителей, но не начали функционировать.

Кроме этого, по общим оценкам на орбитах сейчас находится также около тонны частиц меньше 10 см и полтонны - меньше 1 см, которые относятся к не каталогизированным космическим объектам [10].

Для разрешения проблемы обеспечения безопасного функционирования космических средств и защиты КА создана и в настоящее время успешно реализуется государственная программа «Автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном пространстве» (АСПОС ОКП). Основными задачами системы являются:

- сбор, обработка, анализ, систематизация, каталогизация и актуализация информации по антропогенным и естественным объектам и событиям в околоземном пространстве.

- выявление объектов «риска» и прогнозирование возможных опасных ситуаций.

- организация специальных режимов наблюдений и информационно-баллистическое сопровождение опасных ситуаций с оперативным оповещением «заинтересованных» потребителей информации.

Она объединяет в своем составе наземные (радиолокационные и оптические), морские и космические средства, развернутые для обнаружения, сопровождения объектов АЧ и выдачи информации предупреждения о

возможных столкновениях. Возможности существующей системы по предупреждению об опасных ситуациях в околоземном пространстве представлены на рисунке 1.

Оценивая их видно, что существуют ограничения по размерам наблюдаемого АЧ (в настоящее время это 10 см, в перспективе – до 5 см). С другой стороны, даже перспективная прочность конструкций обеспечивает защищенность КА только для АЧ размером до 1 см.

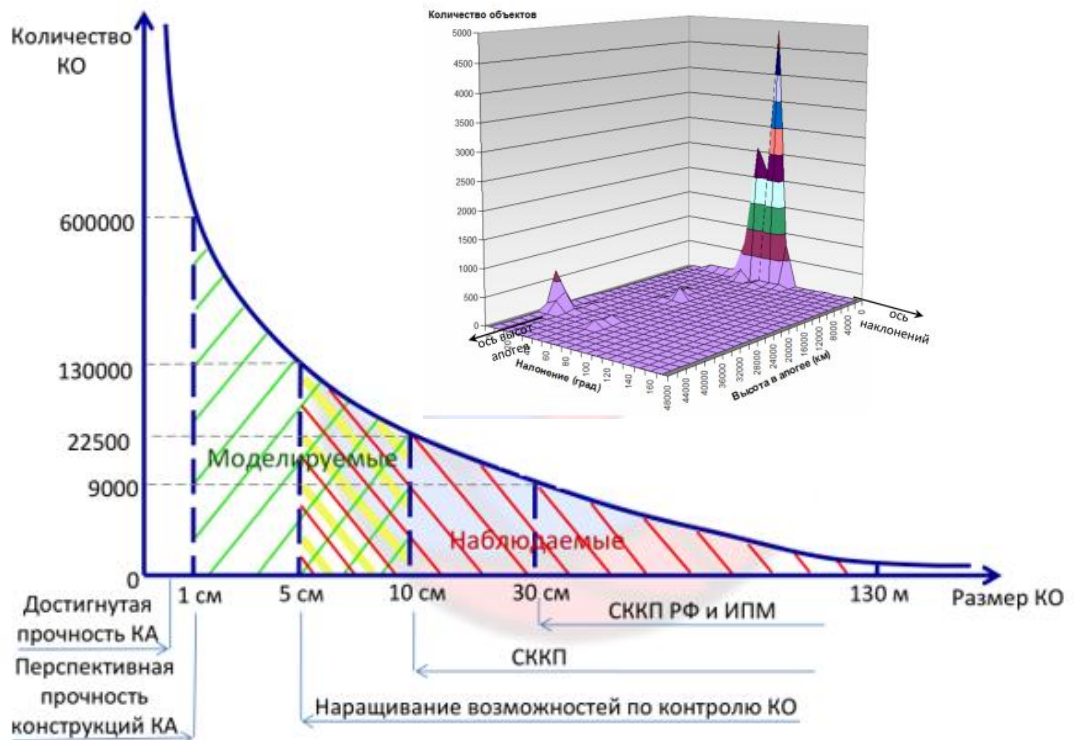


Рис. 1- Общая характеристика техногенной обстановки в ОКП [10].

Задача выявления опасных сближений, расчёта вероятности и прогноза результатов возможного столкновения на орбитах космических аппаратов различного типа является основой для оценки безопасности полетов и выработки стратегии безопасного управления КА.

Указанные задачи актуальны для всех этапов полета:

-при запуске ракетносителя потенциально опасные объекты существуют на этапах выведения, что составляет порядка 80 км;

- постановка КА в заданную точку проводится в несколько этапов, что требует проведения маневров. Каждое изменение пространственного положения связано с возможной угрозой столкновения с АЧ;

- функционирование КА на орбите в условиях возможного воздействия антропогенных частиц.

В космическом пространстве время до столкновения определяется расстоянием между объектами, но с учетом их вращения вокруг центра Земли. Столкновение может произойти с разницей в один виток, что минимально составляет около 90 мин. Этого времени может быть достаточно для оценки обстановки и постановки барьера безопасности, поэтому оперативное выявление АЧ риска, автоматический прогноз результатов такого воздействия и подключение соответствующего барьера безопасности является актуальной научно-практической задачей.

Барьером безопасности могут быть:

- физическое свойство,
- конструктивная характеристика;
- технологическое устройство.

Эффективность барьера определяется в пространстве: оперативность, экономичность и действенность (надежность) барьера безопасности.

Барьеры, противостоящие одному и тому же событию, должны быть независимы друг от друга и при возможности отличаться по природе, т. е. это может быть механический, электрический, электронный, программный и др. способ защиты от антропогенных частиц.

Задача обеспечения безопасности КА решается в два этапа:

1. На этапе проектирования, разработка комплекса защитных мер, имеющих свою специфику и их реализация на этапе производства КА [11, 12, 13];

2. Выбор (подключение) барьера безопасности на основе оценки эффективности защитных мер и условий, складывающихся при угрозе воздействия АЧ.

Выделяют три вида защиты КА от возможного воздействия АЧ: пассивная, активная и операционная (стандарт IADC) [14].

Пассивная защита включает усиление приборного контейнера и элементов КА путем нанесения специальных защитных покрытий (например, экранно-вакуумная теплоизоляция) или установки защитных экранов (бамперов) для бронирования корпуса КА и его конструкций. Известен способ защиты, включающий формирование защитного экрана, его отделение от защищаемого аппарата и направление в сторону потенциально опасных объектов [15].

Для выбора мер пассивной защиты необходимо учитывать: размеры, материал и скорость объектов АЧ, которые могут поразить КА, а также время для развертывания выносных экранов. В настоящее время проблема защиты КА от воздействия частиц мелкого космического мусора может быть решена только за счет применения защитных экранов. Анализ конструктивных схем различных защитных экранов позволил выявить особенности средств пассивной защиты [14]:

- 1) Для изготовления защитных экранов КА, защищающих от воздействия высокоскоростных частиц наиболее эффективны экраны из легких материалов (углепластиков), а толщина экрана должна быть больше, чем размер частицы. Экран устанавливается на расстоянии не менее 20...30 размеров частицы от защищаемой конструкции.

- 2) Однослойный экран не способен защитить конструкцию от частицы, летящей со скоростью более 5 км/с.

- 3) Для защиты от высокоскоростных частиц (скорости соударения более 7 км/с), размером более 5 мм необходимо применять многослойные экраны из сэндвич панелей. Для изготовления панелей необходимо применять материалы, обладающие высокой энергопоглощающей способностью.

- 4) В случае пробития экрана, для защиты от облака, состоящего из фрагментов разрушившейся частицы и осколков разрушенного экрана

необходимо устанавливать второй более легкий экран, обеспечивающий защиту.

Активная защита основана на совместном использовании средств обнаружения и предупреждения о возможном столкновении с АЧ и подключение аварийных программ: маневра выведения КА из опасной зоны на другую орбиту, маневра уклонения КА от столкновения с опасным фрагментом АЧ и последующим возвращением на исходную орбиту; возможно изменения орбиты других тел для исключения столкновения. Например, вокруг пилотируемых станций формируется «защитный периметр» в форме параллелепипеда размером в четыре километра в высоту (по 2 километра вверх и вниз от станции) и - 25 в длину и ширину. Информация поступает на пульт и в течении определенного времени выполняется манёвр. Сигнал об опасности подается в ЦУП за 28,5 часа до возможного момента столкновения. Активные способы защиты КА целесообразны к применению, если полная механическая энергия АЧ превышает возможности ее рассеивания средствами пассивной защиты. Критическими характеристиками активной защиты являются: время до возможного столкновения, которое определяет располагаемое время для расчетов и проведения маневра и запасы топлива на борту, необходимые для коррекции и дальнейшего функционирования КА.

Операционная защита предусматривает выполнение набора команд (программ) управления, связанных с изменением режимов работы бортовых систем, компоновочной схемы конструкций и ориентации КА относительно центра масс для снижения ущерба от налетающих частиц АЧ. Например: управляемое изменение профиля КА с целью уменьшения его сечения, варьирование структурной компоновкой модулей аппарата или формирование защитных встречных потоков выбранных сред в различном фазовом состоянии с целью дефрагментации опасных объектов.

Требованиями по операционной защите являются: соответствие времени до возможного столкновения и времени на выполнение команд

(программ) управления, наличие достаточных запасов топлива на борту, а также точные сведения о размерах, материале и скорости АЧ, который стремится воздействовать на КА.

Формирование комплекса мер на этапе разработки и производства позволяет заблаговременно предусмотреть и внедрить меры достаточные для защиты КА различного целевого назначения [16, 17, 18]. Это предполагает выбор материалов и компоновочной схемы построения КА, определение характеристик основных бортовых систем и их размещение в приборном контейнере, разработку аварийных программ по переводу КА в дежурный режим и т.д. Решения на этом этапе связаны с поиском компромисса между допустимым уровнем ущерба КА при столкновении с АЧ, добавленной массой средств защиты и допустимым снижением массы полезной нагрузки. При этом, добавление брони увеличивает не только массу аппарата, но и площадь его поперечного сечения, что повышает вероятность столкновения с АЧ.

Методической основой указанной операции может рассматриваться построение группового упорядочивания несравнимых между собой по Парето мер обеспечения безопасности КА.

Все рассматриваемые барьеры (комплексы мер)  $x \in X$  упорядочиваются по отдельным показателям и группируются по признаку их несравнимости в отдельные подмножества. Для реализации на этапе разработки и производства КА выбираются барьеры, включающие элементы первого подмножества - несравнимые (наилучшие) по отдельным критериям.

В условиях орбитального функционирования КА должна решаться задача выбора и подключения барьера безопасности (набора предусмотренных мер), который является достаточным по уровню надежности и адекватным складывающейся ситуации. Содержанием этого этапа является уточнение оценки эффективности способов с учетом важности параметров: по располагаемому до столкновения времени, имеющемуся на борту запасу топлива и требованиям по дальнейшему использованию и

существованию КА.

Например, при автономном функционировании космических средств, для исключения возможности попадания в область катастрофического развития аварийной ситуаций (АС) при угрозе столкновения с АЧ необходимо предусмотреть переход к заранее подготовленным устойчивым состояниям КА, в которых не допускается нежелательное развитие АС. В качестве таких состояний, например, установлены: режимы ориентированного дежурного полёта (ОДП) и неориентированного полёта (НП). Переход в эти режимы должен быть проведен своевременно с использованием бортовых алгоритмов «встроенной самоорганизации», а при наличии командной радиолинии с привлечением наземного пункта управления.

Оценка эффективности барьеров является многокритериальной задачей анализа, которая возникает при разработке и изготовлении промышленных систем и требует своего уточнения в процессе их функционирования при реальной угрозе столкновения с АЧ.

Для решения задач в автономного функционирования КА разработана комплексная интеллектуальная информационная система предназначенная для обеспечения выработки своевременных решений по оперативному управлению КА при решении задач: обнаружения сторонних космических объектов, ведению оперативного каталога КА, собственно прогнозирования опасных сближений (в соответствии с критерием) и оценке результатов такого прогноза с формированием сигналов предупреждения по опасному сближению и возможному столкновению. Она представляет распределенную информационную систему, решающую расчетные и интеллектуальные задачи с использованием данных собранных на Земле и в космосе.

Отличительной особенностью КИИС защиты от воздействия антропогенных частиц является режим ее автоматического функционирования, который обеспечивает в цикле работы БУВМ (бортовой

управляющей машины) автономное решение задач обнаружения, распознавания, оценки опасности антропогенных частиц, прогнозирования результатов их воздействия, а также оценки эффективности барьеров безопасности и обеспечение защиты КА, адекватной складывающейся обстановке.

Структурная схема КИИС представлена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 - Структура комплексной информационной интеллектуальной системы защиты от антропогенных частиц

В состав КИИС входят:

- модуль обнаружения и распознавания объектов АЧ;
- модуль интеллектуального прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц и выбора управляющего воздействия по реализации защиты КА, адекватной складывающейся обстановке;
- база данных результатов экспериментальных исследований и моделирования воздействия антропогенных частиц.



## **1.2. Анализ применимости математических моделей и методов, используемых для прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц**

Для оценки воздействия АЧ на элементы космической техники используют экспериментальные методы и проведение моделирования [19].

Экспериментальные методы предполагают исследование взаимодействия частиц и мишеней при высоких скоростях (до 10 км/с и более, в зависимости от массы ускоряемой частицы). Недостатком экспериментальных методов является их высокая стоимость и трудности или невозможность ускорения тел при скоростях более 6-8 км/с.

Моделированию, изучению процессов и описанию, и предсказанию гиперскоростного взаимодействия твердых тел посвящены работы [21,22]

Описаны математические и аналитические модели для описания процесса повреждения и разрушения элементов при гиперскоростном ударе [23 ,25].

Для изучения проблемы гиперскоростного воздействия антропогенных частиц необходимы достоверные данные о характеристиках частицах, о закономерностях процессов деформирования и прочности различных материалов и деталей, узлов и конструкций элементов. Изменение конструкции летательного аппарата, учёт экстремальных условий эксплуатации, сложность явлений, сопровождающих процесс гиперскоростного взаимодействия твердых тел, повышает вероятность неопределенности разрушения и эволюции жизненно важных элементов КА и риск нарушения его функционирования.

Наличие математической модели гиперзвукового взаимодействия твердых тел, которая адекватна экспериментальным данным, позволяет описать процесс близкий к реальному. Моделирование позволяет получить нужную информацию непосредственно из зоны деформации и разрушения взаимодействующих тел, даёт возможность «заморозить» процесс удара на любой стадии его развития, представить степень деформации, структуру и области разрушения, исследовать динамику процесса, поэтапно

проанализировать механизм разрушения различных материалов, элементов и конструкции в целом. Результаты моделирования позволяют прогнозировать риски повреждения и принимать необходимые меры для защиты элементов и КА в целом.

Моделирование гиперскоростного взаимодействия твердых тел осуществляется, как правило, аналитическими или численными методами, в том числе методом конечных элементов (МКЭ) [26] и позволяет производить оценку сложных процессов. Однако, для использования результатов моделирования необходима верификация данной модели другим моделям и экспериментальным результатам.

Перспективным является численное моделирование интенсивного динамического взаимодействия твердых тел при высокоскоростном ударе в программных средах ANSYS и LS-DYNA [24, 27]. Численное моделирование может оказаться полезным инструментом для изучения гиперзвукового взаимодействия частиц и элементов КА и прогнозирования ущерба КА.

Эти среды использованы при моделировании весьма сложных процессов, например, группового удара элементов по стенке с учетом гетерогенности материалов и вероятностной фрагментации и взаимодействия осколков между собой [28, 29].

Аналитические и численные методы моделирования могут быть полезны для расширения ограниченного набора экспериментальных результатов для других конфигураций, форм и составов, и условий взаимодействия частиц с КА, чтобы выявить наихудшие условия, которые могут быть использованы в разработке систем защиты КА. Если эти математические и компьютерные модели совпадают с достаточным количеством экспериментальных данных, то они могут быть использованы для прогнозирования рисков и предотвращения нештатных ситуаций. В целом это позволяет повысить живучесть КА и свести к минимуму возможность их серьезных аварий.

Общим подходом к оценке безопасности КА является требование [30], где показателем стойкости КА к механическому воздействию высокоскоростных частиц естественного и техногенного происхождения определена вероятность его не повреждения (ВНП).

В источнике [31] оценка ВНП проводится с использованием закона Пуассона, т.к. соударение с техногенными частицами происходит случайным образом:

$$ВНП = e^{-N},$$

где  $N$  - число пробоев оболочек КА АЧ за срок активного существования рассчитывается по соотношению:

$$N = A_T \cdot \sum_{j=1}^{n_{эл}} k_j \cdot \delta_j^{-3S} \cdot F_j \cdot T \cdot k_i \cdot \rho_h \cdot k_t$$

где  $A_T$  - коэффициент из закона распределения антропогенных частиц по массам;

$k_i$  - коэффициент учета наклона орбиты КА;

$\rho_h$  коэффициент нормированной концентрации антропогенных частиц;

$k_t$  - коэффициент, учитывающий год (t), когда будет эксплуатироваться КА;

$j$  - номер элемента поверхности;

$n_{эл}$  - число элементов, на которые разбита поверхность КА;

$k_j$  - поправочный коэффициент;

$\delta$  - толщина оболочки, изготовленной из дюрала (Д16АТ), см;

$T$  - активный срок существования КА, сутки;

$F$  - площадь элемента поверхности, м<sup>2</sup>.

ВНП идентична показателю надежности элемента поверхности отсека КА по критерию не пробоя. Её оценка хотя бы одного из отсеков КА (идентична показателю надежности всего КА) вычисляется по формулам:

$$ВНП = \prod_{j=1}^{n_{эл}} p_{j_{ВНП}} \quad \text{или} \quad ВНП = \exp(-N_{КА})$$

где  $n_{эл}$  - число элементов поверхности КА,

$$N_{KA} = \sum_{j=1}^{n_{zi}} N_j - \text{число пробоев на поверхности всех элементов} .$$

Так как полет КА происходит при различных условиях взаимного расположения КО и оболочки отсеков не всегда изготовлены из Д16АТ, то для вычисления числа пробоев приходится вводить ряд допущений и предположений, учитывающих специфику работы КА и проводить верификацию по каждому вводимому отличию.

В источнике [32] указанная вероятность определяет отсутствие за время  $\tau$  «опасного» столкновения высокоскоростной частицы с уязвимой поверхностью КА ( $n = 0$ ):

$$ВНП \equiv P_{n=0} = e^{-\bar{N}} ,$$

для которого величина  $\bar{N}$  определяется из выражения:

$$\bar{N} = N_{кр} S_{эл} \tau ,$$

где  $N_{кр}$  — значение средне интегрального потока высокоскоростных частиц с критической массой  $m_{кр}$  - предельным минимальным значением массы частицы АЧ, при котором повреждается (в соответствии с принятым критерием) рассматриваемый элемент поверхности КА,  $m^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ ;  $S_{эл}$  - рассматриваемая площадь уязвимого элемента поверхности КА,  $m^2$ ;  $\tau$  — заданное время наблюдения, в пределе - время активного существования КА, год.

В известном источнике [14] вероятность не повреждения оценивается:

$$ВНП = e^{-(N_1 + N_2)} ,$$

где:  $N_1$  — число встреч с АЧ, за время существования КА

$N_2$  — число встреч с АЧ, не приводящих к повреждению КА за время его активного существования.

Исходными данными рассматривается значение:

$$N_1 = V_{КА} \cdot \rho ,$$

где  $V_{КА}$  - объем КА,  $\rho$  - пространственная плотность частиц. Пространственная плотность частиц может быть определена из ГОСТ Р 25645.167-2005.

Величина  $N_{кр}$  зависит от критической массы  $m_{кр}$ , а при известной плотности материала частиц АЧ может быть сведена к зависимости от критического диаметра  $d_{кр}$  АЧ, наносящих ущерб защите КА.

Поэтому задача определения ВНП сводится к расчету значения  $d_{кр}$ , что в свою очередь, определяется с использованием баллистических предельных уравнений (БПУ). БПУ представляют собой соотношения для определения минимального диаметра (минимальной массы) АЧ, при которой происходит повреждение стенки. Алгоритм оценки ВНП на основе расчета  $d_{кр}$  включает:

- определение конструктивных параметров и прогнозируемого времени активного существования КА;

- используя баллистические предельные зависимости для расчета  $d_{кр}$  от скорости АЧ при столкновении;

- на основе модели космической среды определяем значение средне интегрального потока высокоскоростных частиц с размером  $d_{кр}$ ;

- рассчитываем значение ВНП.

Известные БПУ для одиночной стенки рассмотрены в [32-34].

Баллистические предельные зависимости в целом плохо определены для находящихся в широком диапазоне диаметров частицы и скоростей. Это подтверждается множеством работ, в основном зарубежных, с модификацией разработанных ранее БПУ [32-34]. В них, модификация известных зависимостей проводится с использованием результатов экспериментальных исследований и данных наблюдений и измерений, выполненных на сопровождаемых и возвращаемых КО.

Многослойная защита на основе сэндвич-структур, предложенная Фредом Уипплом в 1947 г., также может быть оценена на основе БПУ. Это позволяет рассчитать толщину передней стенки со стороны удара и

минимальную толщину задней стенки, при которой не наступает повреждения.

Наиболее известна многослойная защита, построенная по двустенной схеме, которая представлена на рисунке 1.5. АЧ

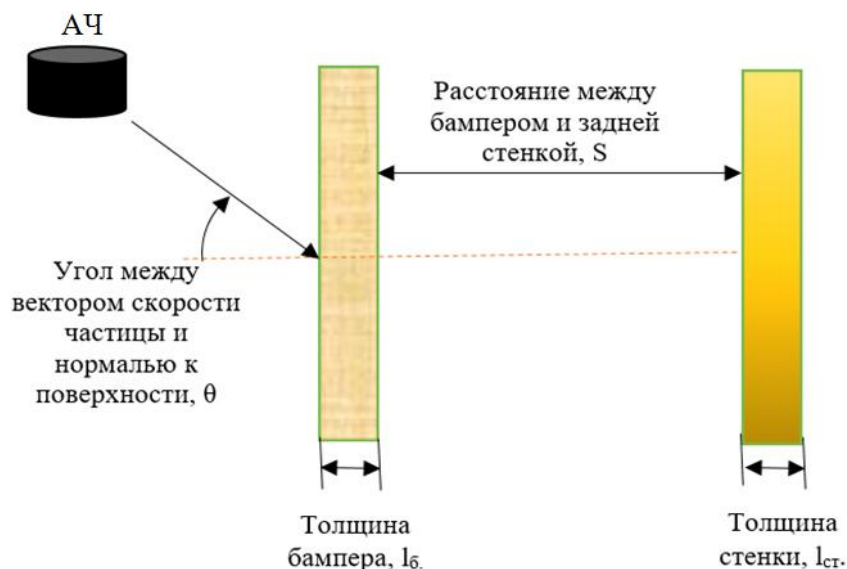


Рисунок 1.5 Двустенная защита (защита Уиппла)

В настоящее время известно множество баллистических предельных уравнений и их модификаций для двух и более стенок.

В литературе рассмотрены ссылки на БПУ следующих авторов [32]: Lundeberg Stern-Bristow (1965 г.), Lundeberg Stern-Bristow (1965 г.), Nysmith (1969 г.), Wilkinson (1969 г.), Burch (1967 г.).

Наиболее известные и используемые баллистические предельные уравнения основаны на исходном уравнении Кур-Паласа (Cour-Palais) (1979 г.), значения которого могут быть сопоставлены с экспериментальными данными испытаний воздействия АЧ с соответствующими параметрами, но только в ограниченном диапазоне скоростей, углов и составе рассматриваемых материалов.

Широко используемыми в настоящее время БПУ являются:

- ESA Тройная стенка (Дрольшаген и Борде, 1992 г)
- Модифицированное «Christiansen- Cour-Palais» (Кристиансен, 1993 г)
- NASA 1 + ISS
- NASA 2 + Shock

- NASA 3 + Bumper
- Модифицированное «ESA Тройная стенка»
- Новое «Christiansen-Cour-Palais» (Кристиансен) (2007 г.)

Указанные уравнения являются достаточно чувствительными к изменению всех существенных характеристик защиты с бампером, что весьма важно при проведении сравнительных расчетов с целью совершенствования защиты от АЧ.

Все указанные зависимости основаны на учете влияния следующих параметров, присутствующих в уравнениях:

- толщины стенки;
- характеристики материала стенки (плотность и/или напряжение текучести);
- свойства материала ударяющей частицы (размер/диаметр и плотность);
- скорости ударяющей частицы;
- угла соударения в отсчете от нормали к поверхности стенки (бампера).

В настоящее время не существует уравнений, которые объединяют все эти параметры. Анализ семейства БПУ и проверка результатов полученных по расчетам ВВП, позволили сформулировать требования к структуре предельной баллистической зависимости:

- значимые параметры, определяющие результаты воздействия должны присутствовать в зависимости в полном составе;
- она должна быть адекватной для всего диапазона возможных значений указанных параметров, а не только в фиксированных точках.

В таблицах 1.1 – 1.5 сведены результаты влияния основных переменных БПУ на величину  $d_{кр}$  для высокоскоростного удара со стенкой КА выполненной по схеме Уиппла. В качестве базового выбран вариант удара со следующими значениями параметров:  $\theta = 0^\circ$ ;  $l_{cm} = 0,2$  см;  $\sigma_{ст} = 276$

МПа;  $S = 2$  см;  $l_6 = 0,055$  см;  $\rho_6 = 2,85$  г/см<sup>3</sup>;  $\rho_ч = 2,5$  г/см<sup>3</sup>. Результаты для базового варианта удара выделены цветом.

Таблица 1.1 Варьирование переменных производится для величины угол между вектором скорости частицы и нормалью к поверхности  $\theta$

Скорость взаимодействия АЧ и КА в точке встречи $v_n$ , км·с <sup>-1</sup>	dкр, см		
	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$
3	0,15	0,2	0,3
7	0,25	0,25	0,25
12	0,18	0,20	0,22
20	0,12	0,13	0,16

Таблица 1.2 Варьирование переменных производится для величины толщина стенки  $l_{ст}$

Скорость взаимодействия АЧ и КА в точке встречи $v_n$ , км·с <sup>-1</sup>	dкр, см		
	$l_{ст}=0,2$ см	$l_{ст}=0,3$ см	$l_{ст}=0,4$ см
3	0,15	0,19	0,25
7	0,24	0,32	0,40
12	0,18	0,22	0,27
20	0,12	0,17	0,19

Таблица 1.3 Варьирование переменных производится для величины напряжения текучести материала задней стенки  $\sigma_{ст}$

Скорость взаимодействия АЧ и КА в точке встречи $v_n$ , км·с <sup>-1</sup>	dкр, см		
	$\sigma_{ст}=138$ МПа	$\sigma_{ст}=276$ МПа	$\sigma_{ст}=552$ МПа
3	0,16	0,12	0,21
7	0,24	0,20	0,31
12	0,17	0,13	0,22
20	0,12	0,10	0,17

Таблица 1.4 Варьирование переменных производится для величины плотность материала частицы  $\rho_ч$

Скорость взаимодействия АЧ и КА в точке встречи $v_n$ , км·с <sup>-1</sup>	dкр, см		
	$\rho_ч = 2,5$ г/см <sup>3</sup>	$\rho_ч = 4,0$ г/см <sup>3</sup>	$\rho_ч = 7,0$ г/см <sup>3</sup>
3	0,09	0,11	0,16
7	0,18	0,21	0,24
12	0,12	0,15	0,17
20	0,09	0,10	0,12

Таблица 1.5 Варьирование переменных производится для расстояния между бампером и задней стенкой S

Скорость взаимодействия АЧ и КА в точке встречи $v_n$ , км·с <sup>-1</sup>	dкр, см		
	S=2см	S=4см	S=6см
3	0,15	0,2	0,3
7	0,25	0,25	0,25
12	0,18	0,20	0,22
20	0,12	0,13	0,16



3	0,15	0,15	0,15
7	0,24	0,31	0,35
12	0,18	0,22	0,26
20	0,12	0,16	0,18

Недостатком рассмотренных моделей является невозможность построить универсальную зависимость, которая бы учитывала все многообразие условий воздействия АЧ. Информация, необходимая для его построения требует огромного объема данных не доступных для сбора и представляющих собой статистически неустойчивые выборки значений, зависящие от различных условий. Это приводит к большим погрешностям вычислений. Известно, что погрешность при прогнозировании  $d_{кр}$  для различных материалов составляет до 25%. Основной причиной является то, что физику процесса соударения частицы со стенкой отражают числовые коэффициенты, которые требуют постоянного учета.

Меры, связанные с усложнением структуры моделей, детальным учетом факторов и явлений приводит к повышению степени сложности моделей и обостряет проблему неопределенности. Наличие неопределенности является причиной невозможности прогнозирования результатов воздействия частиц, с приемлемой для практики точностью.

Таким образом, можно выделить следующие основные проблемы, присущие задаче прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц на космическую технику:

1) возможность сбора большого количества данных по взаимодействию КА и АЧ и практическое отсутствие их статистической устойчивости, что ставит под сомнение степень доверия к моделям, построенным методами теории вероятностей и классической математической статистики;

2) недостаточную достоверность представления результатов прогнозирования в виде детерминированных предельных баллистических уравнений, поскольку многие влияющие факторы имеют нечеткую природу

и сложно поддаются формализации при применении традиционных методов моделирования.

Кроме того, громоздкие модели требуют регулярной калибровки и верификации, что основано на затратах времени и финансовых вложений на уточнение исходных данных и параметров моделей. Объем вычислений по каждой обнаруженной частице соизмерим с решением задач баллистического обеспечения самого космического аппарата и требует больших вычислительных мощностей. В условиях автономного функционирования КА требуется метод прогнозирования, при использовании которого характеристики достоверности результатов будут приемлемыми, а для их определения не потребуется существенных машинных и временных ресурсов.

Методологической основой разработанных алгоритмов прогнозирования и выбора барьера безопасности в условиях неопределённости является аппарат алгебры нечетких множеств и теория нечеткого логического вывода.

### **1.3. Анализ существующих способов построения баз знаний интеллектуальных систем прогнозирования**

Раздел написан на основе материалов [38, 39, 40].

В рамках проводимых исследований поставлена задача построения базы знаний интеллектуальной информационной системы, которая учитывает результаты прогнозирования воздействия антропогенных частиц и эффективно применяется в условиях неопределенности. БЗ должна соответствовать требованиям адекватности, полноты и непротиворечивости, а также точности и интерпретируемости получаемых результатов. Механизмы ее построения должны предусматривать возможность внесения новых сведений о предметной области и использовать эти сведения для поддержания БЗ в актуальном состоянии, в том числе ее своевременной корректировке (обучению).

Нечеткая логика и теория нечетких множеств служат основой большого количества методов исследования и моделирования систем, которые относятся к области искусственного интеллекта.

Нечеткая логика – это раздел многозначной логики, который основывается как на обобщенной классической логике, так и на теории нечетких множеств, которую предложил американский математик Заде для формализации нечётких знаний, которые характеризуются лингвистической неопределенностью. Предметом нечёткой логики является исследование рассуждений в условиях нечёткости, размытости, неопределённости, сходных с рассуждениями в привычном понимании.

Нечеткая логика является обобщением обычной булевой логики, используемой для цифрового проектирования связей. Если вход по булевой логике имеет значение "верно" или "неверно", то в нечеткой логике вход связан с определенными качественными характеристиками. Например, скорость воздействия может быть "низкой", "средней" или "высокой". Нечеткая логика может логически вывести выходы из нечетких входов. В этом смысле нечеткая логика является одним из множества методов для отображения входа к выходу. Именно поэтому система нечеткой логики может быть эффективной при использовании в прогнозировании.

Теория нечеткой логики подходит для описания некоторого класса неопределенностей, и в то же время, она имеет сильную способность нелинейного отображения, которое можно извлечь из данных.

Нечеткий логический вывод – это процесс получения четких заключений о требуемом управлении объектом на основе нечетких условий или предпосылок, представляющих собой информацию о текущей ситуации, представленной набором параметров являются продолжением экспертных систем. На их основе строятся оптимальные структуры нечеткого вывода с минимальными ошибками моделирования и количеством функций принадлежности для понимания нелинейного поведения при кратковременных возмущениях. При этом важным остается наличие

нечетких правил формируемых с привлечением опытов экспертов и результатов проводимых экспериментов.

Нечетким множеством  $\tilde{A}$  на универсальном множестве  $U$  называется совокупность пар  $(\mu_A(u), u)$ , где  $\mu_A(u)$  - степень принадлежности (число из диапазона  $[0,1]$ ) элемента  $u \in U$  нечеткому множеству  $\tilde{A}$ . Чем выше степень принадлежности, тем большей мерой элемент универсального множества принадлежит свойствам нечеткого множества.

Нечеткая модель представляет метод, состоящий в приближении зависимости «входы — выход» на основе лингвистических высказываний типа «если — то» и операций нечеткого логического вывода [38]. К основным терминам теории нечетких множеств, можно отнести:

- функция принадлежности;
- лингвистическая переменная (ЛП);
- нечеткая база знаний (НБЗ);
- фаззификация;
- дефаззификация;

Функция принадлежности – это функция, которая позволяет произвольному элементу универсального множества вычислить степень его принадлежности нечеткому множеству.

Лингвистическая переменная – это переменная, значение которой могут быть слова или их сочетания некоторого естественного языка.

Терм-множество – это множество всех возможных значений лингвистической переменной.

Терм – это любой элемент терм-множества. В теории нечеткого множества терм образуется нечетким множеством с помощью функции принадлежности.

Структура нечеткой модели показана на рис. 1.7:

- при фаззификации исходные значения влияющих факторов преобразуются в вектор нечетких множеств, который необходим для получения результатов нечеткого логического вывода;

- нечеткие правила отражают лингвистические зависимости;
- нечеткий логический вывод на основе правил формирует значение выходной переменной в виде нечеткого множества, которая соответствует нечетким значениям на входе;

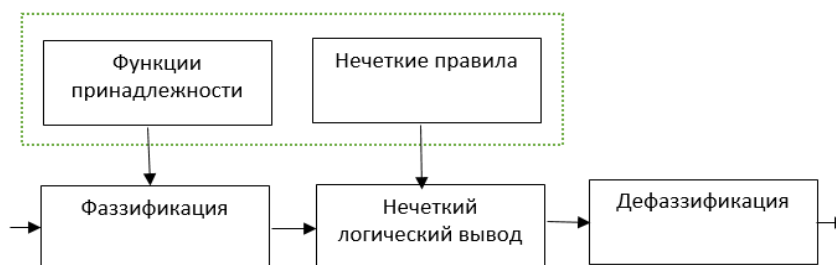


Рис. 1.7. Структура нечеткой модели.

- при дефаззификации выходное нечеткое множество преобразуется в четкое число.

Существующие способы построения базы знаний (БЗ) предназначены структурированных проблемы (набор признаков и перечень возможных решений) считается известной. Применяются следующие способы построения баз знаний [38]:

1. Эксперт сам указывает цепочки своих логических рассуждений, ведущих от причин к следствиям. Достоинством этого способа является то, что эксперт дает свои знания в виде цепочки причинно -следственных связей типа: "если..., то..." (продукции), которые легко реализовать на ЭВМ. На базе таких продукций возможно построить блок объяснений. Имеются два существенных недостатка этого способа. Прежде всего в любой реальной задаче количество продукции, необходимое для построения полной БЗ, очень велико и эксперт не может "перечислить" их все за разумное время, необходимое для построения системы. Во-вторых, эксперт "знает больше, чем может сказать". Иначе говоря, эксперту предстоит решать непривычную для него задачу - задачу синтеза своих знаний, в то время как в своей практической деятельности он обычно решает задачу анализа конкретных ситуаций.

2. Эксперт определяет вероятности влияния отдельных признаков на принадлежность ситуаций к конкретным состояниям. Эксперт может

указать, с какой вероятностью то или иное значение рассматриваемого признака соответствует тому или иному исходу. В этом случае трудоемкость построения БЗ резко снижается и можно охватывать большое число признаков и большое число исходов так как каждая пара "признак-исход" рассматривается отдельно. Этот способ имеет ряд очень существенных недостатков:

- назначение вероятностных оценок является крайне сложна для человеческой системы переработки информации задачей;

- именно сочетание признаков определяют, обладает ли то или иное состояние некоторым свойством, а те же самые признаки, взятые по отдельности, не представляют целостную картину ситуации, а только она позволяет ему в полной мере использовать свою интуицию.

- правила агрегации отдельных вероятностных оценок крайне примитивны. Обычно используется сумма вероятностей оценок, взятие максимума или минимума из вероятностей. Это правило не задается экспертом, никак им не проверяется, а определяется программистом-конструктором БЗ просто на основании удобства.

3. Построение БЗ "на примерах", когда в БЗ вводятся описания реальных ситуаций с точной их диагностикой. Приятно отметить, что в данном случае используются напрямую результаты деятельности эксперта по анализу ситуаций. Однако ясно, что при таком подходе количество таких примеров должно быть громадным для любой сколь-нибудь реальной практической задачи. Кроме того, эти случаи должны быть "разнообразны" - они должны включать различные сочетания диагностических признаков. Все эти случаи должны быть диагностированы тем экспертом, чью базу знаний мы хотим построить.

Несовершенство методов построения БЗ влияет на качество построения интеллектуальных систем. Получение знаний рассматривается как узкое место" (bottleneck) в искусственном интеллекте [41].

Проблема передачи ЭВМ человеческих знаний имеет два основных аспекта: 1) особенности использования ЭВМ при хранении и переработке полученной от людей информации; 2) специфические особенности человеческой системы хранения, осознания и переработки информации, которую тем или иным способом получают от человека при построении БЗ. Первый аспект включает разработку методов распознавания образов и экспертных систем. В рамках второго направления используются человеческие эвристики, появляющиеся при решении проблем, их алгоритмизация. Изучались человеческая система переработки информации, характеристики кратковременной памяти [40]. Были разработаны способы прослеживания процессов решения человеком проблем - устные протоколы. Получено правдоподобное представление об обмене информацией между кратковременной и долговременной памятью. Однако в рамках этих работ не ставилась задача построения БЗ. А тогда, когда эта задача была поставлена в работах по экспертным системам, то особенностям человеческой системы переработки информации не было уделено никакого внимания. Например, эксперту предложено указать количественный фактор уверенности, связанный с продукцией. Этот фактор находится в пределах от + 1 (полная уверенность) до - 1 (отрицание), затем проводятся вычисления и берется минимальное из значений в вершинах деревьев решений. Решение о правильности той или иной гипотезы принимают в случае, когда численная оценка правильности превосходит некоторый эвристический субъективный порог 0,2. При этом не принимаются во внимание накопленные психологией факты о возможностях людей надежно выполнять те или иные операции по переработке информации. Исключение составляют лишь те базы знаний, где эксперт в явном виде указывает все продукции. Обычно этого достаточно лишь для крайне узких применений.

Трудности в построении БЗ приводят ряд зарубежных специалистов к "утешительным" выводам, что БЗ никогда не может быть полной и к этому не надо стремиться. По их мнению, надо создавать "пустые" или почти

пустые системы и обучать их на практических примерах. При этом не страшны и противоречия в БЗ - ведь человек бывает противоречив. Такой взгляд не сулит ничего хорошего. Никто не может при этом оценить, сколько лет может длиться обучение и пополнение БЗ и сколько усилий эксперта (автора БЗ) для этого понадобится. Ясно, что реальные БЗ с их десятками (и сотнями) тысяч возможных состояний создать таким путем можно лишь за время, когда эксперт уже изменит свое первоначальное представление об области исследований. И, наконец, появился еще один способ решения проблемы инженеры-когнитологи (специалисты по знаниям). Понимание трудностей получения знаний от эксперта привело к заключению: пусть контактами с экспертом занимаются особые специалисты. Логика такова: нужно подготовить специалистов, слегка понимающих предметную область и программирование - своего рода посредников, пусть они "выспрашивают" экспертов и строят БЗ. Очень удобный выход для программистов: они теперь освобождаются от ответственности за качество экспертных систем и спокойно могут строить пустые (shell) системы: системы прототипы для построения экспертных систем. На самом деле когнитологи нуждаются в специальных средствах работы с экспертами. Любые требования к эксперту "рассказать, как он думает" упираются в ограниченные возможности самоанализа. Беседы когнитологов с экспертами, необходимые для построения работоспособной БЗ, также могут длиться годами, как и обучение на примерах. Появление микропроцессоров повлекло за собой "открытие" и распространение экспертных систем. На самом деле идеи, на которых они основаны, были известны в начале 60-х годов. Но новые средства открыли новые возможности. Возможность создания компактных "консультантов" в различных областях человеческой деятельности является, без сомнения, притягательной. В идеале экспертные системы должны обладать полной совокупностью знаний. Пользователь должен иметь возможность применять эти системы легко и просто, "ничего не зная" и просто беседуя с ними на



естественном языке. Более того, экспертные системы дают также на естественном языке объяснения своих действий, демонстрируют логику эксперта. Однако мощный поток работ по экспертным системам имеет к настоящему времени более чем скромный выход. Но важно, что этот выход есть: судя по публикациям, есть удачно работающие системы, приносящие реальную выгоду [40]. Успех бывает в тех случаях, когда первоклассный эксперт бывает одновременно и первоклассным программистом. Гораздо чаще успех бывает в простых системах - когда общее число правил невелико (менее 100), их можно перечислить, тщательно проверить. Такие задачи можно решить и другими средствами (но обычно они ранее не рассматривались). И, конечно, успех связан с удачной структуризацией проблемы. В чем же причины многочисленных неудач? Прежде всего, о чем уже говорилось выше, в широком фронте работ по экспертным системам совершенно отсутствуют психологические исследования возможностей получения знаний от экспертов. По мнению создателей экспертных систем, дело заключается лишь в том, чтобы создать для эксперта возможность общения с ЭВМ на естественном (или близком к нему) языке. И тогда проблема построения БЗ решится сама собой. Кроме того, в настоящее время в работах по экспертным системам можно увидеть следующие негативные тенденции.

Судя по публикациям, основное внимание уделяется трем проблемам: созданию все более совершенных языков, разработке способов представления знаний и построению систем-прототипов ("пустых" систем). Все эти три задачи являются задачами для высококвалифицированных программистов. Вероятно, поэтому эти задачи объявляются единственным путем к построению более совершенных экспертных систем. Успехи определяются возможностью создания Лисп-процессоров и Пролог-процессоров, т.е. возможностью использования языков высокого уровня. Возникает впечатление, что средства создания экспертных систем превратились в настоящее время в цели - идет разработка программ ради

создания более совершенных программ. В спешке и хаосе возникают коммерческие экспертные системы стоимостью от нескольких сотен долларов до сотен тысяч долларов, причем в дорогостоящих используются языки высокого уровня. При этом забываются столь жизненно важные для данного направления проблемы, как выявление знаний, приспособленность экспертных систем к реальным задачам, определение областей их целесообразного применения, оценка качества их работы, корректное сопоставление работы экспертных систем и экспертов и т.д. Можно лишь согласиться с мнением Дж. Перроне: "бум в продаже Пролога, Лиспа и Лисп-машин отражает лишь общее непонимание того, чем являются экспертные системы и искусственный интеллект, а не превосходство этих средств. Это лишь попытка купить магию искусственного интеллекта" [40]. Коммерческий бум заглушает реальные оценки более чем скромных возможностей продаваемых экспертных систем.

БЗ является ключевым элементом интеллектуальной системы и к ним предъявляются ряд требований:

- 1) обоснованность т.е. основываться на знаниях высококвалифицированного эксперта;
- 2) полнота т.е. в предварительно очерченной и структурированной предметной области должна содержать ответы на все возможные вопросы;
- 3) непротиворечивость т.е. содержать непротиворечивые ответы на любые заданные вопросы;
- 4) надежный образ построения: учет возможности человеческой системы переработки информации, проверка на непротиворечивость ответов экспертов, вопросы к экспертам должны касаться профессиональной деятельности и быть имитацией их обычной работы.

База знаний является вычислительным и информационно-аналитическим средством, которое должно:

- содержать в себе связи между всеми переменными объекта;
- вычислять значения одних переменных через другие;

- решать, как прямые, так и обратные задачи;
- прогнозировать характеристики и свойства еще не исследованных состояний объектов;
- прогнозировать параметры процесса и объекта для получения результата с требуемыми характеристиками.

Центральной задачей построения БЗ является выбор модели представления знаний [46]. Именно модель представления знаний определяет архитектуру, возможности и свойства системы, а также методы приобретения знаний ИС.

Используются следующие формализмы представления знаний: с помощью фактов и правил, нейронные и семантические сети, исчисления предикатов и фреймы. Критериями оценки моделей представления знаний являются: уровень сложности (абстрактности) элемента знаний, с которыми работает модель; универсальность представления знаний — возможность описания знаний из различных предметных областей; естественность и наглядность представления знаний при использовании; способностью модели к обучению и формированию новых, непротиворечивых знаний; размерность модели по объему памяти, необходимому для хранения элемента модели; удобство разработки системы на основе модели. Современные модели представления знаний по указанным критериям включают:

1. Модель представления знаний с помощью фактов и правил построена на использовании выражений вида:

ЕСЛИ (условие) - ТО (действие).

Если текущая ситуация (факты) в задаче удовлетворяет или согласуется с частью правила ЕСЛИ, то выполняется действие, определяемое частью ТО [47]. Сопоставление частей ЕСЛИ правил с фактами может породит так называемую цепочку выводов — дерево решений [48]. Один из главных недостатков метода представления знаний с помощью правил — значительные затраты времени на построение цепочки

вывода. При частом использовании какого-либо дерева решений система редуцирует ("сжимает") дерево решений до нового правила и вводит его в базу знаний. Это действие называют продукцией правил. Правило такого рода имеет значительно большую размерность, чем исходные правила. Системы, построенные на основе продукционных моделей, более эффективны по затратам памяти и по быстродействию, чем системы, основанные просто на правилах.

По уровню абстрактности элемента модель работает с простейшими составляющими знания — фактами и правилами. Модель направлена на решение простых, однородных задач и производит к резкому падению эффективности решения таких проблем, которые состоят из нескольких разнородных задач. Серьезнейшим недостатком является невозможность эффективно описать правила с исключениями. Объем памяти, необходимый для хранения элемента знаний модели — конструкция ЕСЛИ — ТО, мал в силу его простоты. Однако база знаний, описывающая реальную, даже не очень сложную задачу, должна содержать сотни и тысячи правил [49].

Продукционная модель накладывает ряд ограничений на решаемую задачу, объем знаний и некоторые другие параметры ИС. Она эффективна в узкой и сравнительно хорошо определенной предметную область. Разработанные системы удачными и предпринимались попытки применения данного подхода к другим областям знаний с аналогичными свойствами. Например, из проблемно-независимой части специализированной системы MYCIN создана "пустая" система, названная EMYCIN, которая в последствии использовалась при создании системы SACOM для расчетов механических структур.

2. Модель представления знаний с помощью логики предикатов использует в своей основе математический аппарат одного из разделов математической логики, называемый символьной логикой [50]. Основными формализмами представления предикатов являются "терм", устанавливающий соответствие знаковых символов описываемому объекту

и «предикат» для описания отношения сущностей в виде реляционной формулы, содержащей в себе термы. "предикат", то обычно имеется в виду, что в него входит терм-переменная. Предикат, все термы которого являются термами-константами, называется высказыванием.

По уровню абстрактности элемента знаний эта модель, как и предыдущая, работает с простейшими составляющими знания — фактами и правилами. Модель универсальная, однако, так же, как и модель представления знаний с помощью фактов и правил, не может быть использована для создания БЗ, которые должны одновременно манипулировать специальными знаниями из разных предметных областей.

Способности модели к обучению находятся на среднем уровне. С помощью логики предикатов можно, определяя произвольным образом знания, выяснить, имеются или отсутствуют противоречия между новыми и уже существующими знаниями. Объем памяти, необходимый для хранения элемента знаний — предиката или предикатной формулы, мал в силу его простоты. Однако, база знаний, описывающая реальную, даже не очень сложную предметную область, должна содержать значительное количество указанных элементов.

Модель обладает высокой модульностью, легкостью внесения в систему дополнений и изменений, простотой механизма логического вывода и часто применяется в промышленных ИС.

Одна из первых эффективных БЗ была создана Хаммондом и Серготом. В этой системе устройство Query-the-User комбинируется с оболочкой экспертных систем (APES), предусмотрены также средства для структурирования запросов на естественном языке. Система реализована на микро-Прологе, а очень гибкий инструмент, называемый APE-the-User, предназначен для построения экспертных систем. Она с успехом использована для создания экспертных систем.

3. Модели представления знаний с использованием сетей нейронов положены в работе Маккаллока и Питтса [51], где авторы сделали первую

попытку эмулировать человеческие способности классифицировать и распознавать образы. В их формализме нейроны имеют состояния  $\{0, 1\}$  и пороговую логику перехода из состояния в состояние. Каждый нейрон определяет взвешенную сумму состояний остальных нейронов и сравнивает ее с порогом, чтобы определить свое собственное состояние. Дальнейшее развитие этого направления связано с тем, что Розенблат ввел в модель нейрона способные связи к модификации, что сделало ее обучаемой. Эта модель названа персептроном [52].

Современное развитие моделей нейронных сетей связано с работами Карпентера и Гроссберга [53] и Хопфилда [54], а также основано на успехах в оптических технологиях и развитии СБИС для реализации новых архитектур.

В основу искусственных нейронных сетей положены черты живых нейронных сетей, позволяющие им хорошо справляться с нерегулярными задачами: простой обрабатывающий элемент — нейрон; очень большое число нейронов участвует в обработке информации; один нейрон связан с большим числом других нейронов; изменяющиеся по весу связи между нейронами; массивная параллельность обработки информации.

По структуре связей сети делятся на два больших класса: однослойные и многослойные. Подходы к обучению однослойных и многослойных сетей различны. В однослойных часто удается выразить веса связей через параметры задачи (так обстоит дело с моделью Хопфилда и однослойной машиной Больцмана). Обучение многослойных сетей состоит в том, что на основе набора примеров {входное состояние  $\otimes$  выходное состояние} итеративно подбираются веса всех связей так, чтобы каждое входное состояние вызывало соответствующее выходное.

В рамках данного подхода элементом знания является состояние сети — вектор состояний всех нейронов сети, что можно считать средним уровнем абстрактности представления знаний. Для решения конкретной задачи необходимо организовывать сети со значительным числом нейронов.

Небольшой объем памяти, необходимый для хранения нейрона, позволяет эффективно пользоваться такими сетями.

Основными преимуществами нейросетей является их высокая адаптивность, а также их способностью к обработке зашумленной и неполной информации. Однако переобучение или дообучение сети затрагивает только значения весовых коэффициентов на межнейронных соединениях. Создание же алгоритма обучения так же, как и проектирование структуры сети, являются творческими задачами, выполняемыми специалистами высокой квалификации для конкретных задач. Еще один недостаток нейронных сетей — ненаглядность представления знания: образы, запомненные сетью при обучении, закодированы в виде состояний всех нейронов, а процесс принятия решения не может быть представлен в виде наглядных конструкций ЕСЛИ - ТО.

Модель может применяться для решения задач распознавания образов практически в любой предметной области, например, при решении задач прогнозирования сложных процессов. Нейронные сети могут быть реализованы как программно, так и аппаратно. В настоящий момент на компьютерном рынке предлагается широкий спектр аппаратных средств, обладающих различными спорт-функциями и возможностями [55.]. Среди нейро БИС, которых насчитывается несколько десятков типов, выделяются модели фирмы Adaptive Solutions (США) и Hitachi (Япония).

Большинство нейрокомпьютеров представляют собой персональный компьютер или рабочую станцию, в состав которых входит дополнительная нейроплата. К их числу относятся, например, компьютеры серии FMR фирмы Fujitsu. Известны специализированные нейрокомпьютеры, непосредственно реализующие принципы нейронных сетей. Среди них компьютеры семейства Mark фирмы TRW (первая реализация персептрона, разработанная Розенблатом, называлась Mark I), а нейрокомпьютер NETSIM, созданный фирмой Texas Instruments на базе разработок Кембриджского университета.

4. Модель представления знаний с помощью семантических сетей состоит из вершин, называемых узлами, соответствующих объектам, концепциям или событиям, и связывающих их дуг, описывающих отношения между рассматриваемыми объектами [56]. Дуги могут быть определены разными методами. Обычно для представления иерархии используются дуги типа IS-A (отношение "является") и HAS-PART (отношение "имеет часть"). Они также устанавливают иерархию наследования в сети, т.е. элементы более пониженного уровня в сети могут наследовать свойства элементов более высокого уровня, что экономит память, поскольку информацию о наследуемых свойствах не нужно повторять в каждом узле сети.

Выводы на семантических сетях реализуются через отношения между элементами, что связано с возможностью возникновения противоречий.

Модель универсальная и легко настраивается. Характерная особенность семантической сети — наглядность знаний как системы.

Серьезным недостатком систем CASNET и PROSPECTOR является их неудовлетворительная способное объяснить свои решения.

5. Модель представления знаний с помощью фреймов предложена Марвином Минским, который описывает их следующим образом [57]: "Фрейм — это структура данных, представляющая стереотипную ситуацию, вроде нахождения внутри некоторого рода жилой комнаты или сбора на вечеринку по поводу рождения ребенка. Каждому фрейму присоединяются несколько видов информации. Часть этой информации — о том, как использовать фрейм. Часть о том, чего можно ожидать далее. Часть о том, что следует делать, если эти ожидания не подтвердятся".

Фреймовая модель по своей организации во многом похожа на семантическую сеть. Она является сетью узлов и отношений, организованных иерархически: верхние узлы представляют общие понятия, а подчиненные им узлы — частные случаи этих понятий. В системе, основанной на фреймах, понятие в каждом узле определяется набором



атрибутов-слотов (например, состояние, скорость, дистанция) и значениями этих атрибутов (например, «работоспособен», гиперзвуковая, малая). Каждый слот может быть связан со специальными процедурами, которые выполняются, когда информация в слотах (значения атрибутов) меняется. С каждым слотом можно связать любое число процедур.

Описание некоторой предметной области в виде фреймов обладает высоким уровнем абстрактности. Фреймовая система не только описывает знания, но и позволяет человеку описывать метазнания, т.е. правила и процедуры обработки знаний, выбора стратегий, приобретения и формирования новых знаний. Модель является универсальной, поскольку существуют не только фреймы для обозначения объектов и понятий, но и фреймы-роли (ведущая ЭВМ, резервный элемент, опасный объект), фреймы-ситуации (риск, рабочий режим устройства) и др.

Обучение фреймовых систем затруднено. Приобретение новых знаний возможно только в системах со сложной структурой фреймов. Создание таких систем требует серьезных затрат времени и средств, но они позволяют формировать новые знания на уровне понятий. При этом проблема устранения противоречивых знаний должна решаться самой системой. Для хранения элемента модели требуются значительные объемы памяти, определяемые сложностью конкретного фрейма.

В настоящее время концепция фреймов быстро развивается и расширяется, благодаря развитию методов объектно-ориентированного программирования [58]. Практически во всех современных языках программирования появились специальные структурно-функциональные единицы (объекты, классы), обладающие основными признаками фреймов.

Таким образом, каждая из известных моделей представления знаний обладает как минимум тремя недостатками из приведенного списка: недостаточный универсализм, сложность получения новых знаний, возможность получения противоречивых знаний; сложность наращивания

модели, значительная размерность модели, отсутствие наглядности в представлении знаний.

Поэтому значительное внимание в инженерии знаний уделяется сочетанию разных моделей. Все больше создается ИС, основанных на таких, казалось бы, несовместимых подходах, как нейронные сети и фреймы, семантические сети и логика предикатов и т.п. Учитывая все сказанное, можно сделать вывод о высокой актуальности исследований в этой области, а также о необходимости разработки новых подходов в разработке моделей представления знаний в интеллектуальных системах.

#### **1.4. Постановка научной задачи. Выводы по главе**

Под безопасностью понимается способность КА не переходить во всех заданных режимах эксплуатации в состояние, угрожающее жизни эксплуатирующего персонала, сопрягаемым объектам и природной среде. Безопасность должна быть реализована в процессе эксплуатации и осуществляться за счет использования защитных мер (барьеров безопасности) различного характера. Методы обеспечения технической безопасности включают реализацию конструкторских запасов по отношению к внешним и внутренним воздействующим факторам, проведение анализа рисков с целью определения неприемлемых рисков и мер по снижению их до приемлемого уровня. Живучесть является одной из составляющих обеспечения безопасности КА и используется для контроля рисков. Согласно ГОСТ 27.002-89 [59] живучесть - «...свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов». Одним из требований по живучести КА является то, что все опасные факторы, которые не контролируются принципами отказоустойчивости, должны контролироваться путем выполнения проектных требований по снижению риска или соответствия вероятностным критериям безопасности.

Целью исследования является повышение живучести автономного функционирования КА на основе разработки и внедрения методики построения базы знаний (БЗ) комплексной интеллектуальной системы защиты КА при воздействии объектов АЧ. БЗ обеспечивает решение задач прогнозирования результатов воздействия АЧ, оценки и выбора эффективного барьера безопасности, соответствующего текущим условиям обстановки.

В рамках первой главы диссертации решены следующие частные задачи исследования:

1. Проведен анализ объекта исследования и выявлена проблема функционирования КА в условиях возможного воздействия АЧ. Крупный (более 10 см) АЧ представляет потенциальную опасность разрушения КА, высокоскоростное соударение с мелким и средне- размерным АЧ ведет к повреждению элементов конструкции или пробоем приборного контейнера КА. Реализуемые на этапе КА проектирования меры пассивной защиты обеспечивают защиту от мелких частиц, с размерами до одного сантиметра. Применение более тяжелых защитных материалов (бронирование) приводит к проблеме в соотношении полезной и пассивной нагрузки и связано с сокращением времени активного существования КА. Логика функционирования КА по выполнению аварийных программ, включая маневрирование в плоскости орбиты, требует наличия критерия по их проведению при угрозе воздействия антропогенных частиц разного размера.

2. Проведен анализ предмета исследования и сформулировано противоречие между живучести автономного функционирования КА и отсутствием механизма выбора адекватного барьера безопасности при угрозе воздействия АЧ. В настоящее время безопасность обеспечивается только для наблюдаемого АЧ с размерами более 10 см путем своевременного их обнаружения средствами контроля космического пространства и проведением маневра уклонения. Маневр уклонения характеризуется временем и расходом топлива для его проведения, что

влияет на длительность активного существования КА и его целевое использование (поддержание требуемой ориентации и положения центра масс в пространстве).

3. Определен состав и решаемые задачи бортовой интеллектуальной информационной системы защиты от антропогенных частиц, центральной задачей построения которой является разработка базы знаний.

4. Проведен анализ известных методов построения баз знаний интеллектуальных систем и моделей представления знаний в памяти ЭВМ. Сформулирована цель исследования, связанная с повышением живучести автономного функционирования КА путем разработки и внедрения методики построения базы знаний КИИС.

Научная задача исследования состоит в разработке методики построения базы знаний КИИС, которая в составе модуля интеллектуального прогнозирования обеспечивает автоматическое решение задач прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц ( $K_d$ ), определение вероятности не повреждения КА ( $R(K_d)$ ), а также оценки и выбора барьера безопасности КА ( $s^*$ ) на всем множестве реализованных на борту мер по безопасности КА ( $S$ ) при ограничениях на требуемую надежность защиты ( $R(s)$ ), располагаемое время ( $T_p$ ) и затраты топлива ( $N_p$ ) на реализацию выбранного барьера, а также позволяет проводить автоматическую настройку по изменениям в предметной области, связанными с различиями условий взаимодействия и новыми данными по результатам испытаний и столкновений в космосе:

$$Mt : s^* = \arg \max_{s \in S} K_s(s)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R(s) \geq R(K_d) \\ T(s) \leq T_p \\ N(s) \leq N_p \end{array} \right. ,$$

где  $K_s(s)$ -целевая функция защищенности КА от воздействия АЧ, аргументом которой рассматривается каждый из реализованных на борту барьеров безопасности. Физический смысл коэффициента защищенности  $K_s$  связан с оценкой эффективности барьера безопасности, порядок его вычисления определяется принципом слияния нечетких целей и ограничений (Беллмана-Заде) и включает автоматическое вычисление оценок параметров барьера безопасности ( $c_i$ ), важности этих параметров ( $f_i$ ) с учетом потенциальных возможностей барьера ( $R(s)$ ,  $T(s)$ ,  $N(s)$ ) и условий взаимодействия ( $R(Kd)$ ,  $T_p$ ,  $N_p$ ).

## **Глава 2. Методика построения базы знаний комплексной интеллектуальной информационной системы по защите от антропогенных частиц**

База знаний - программная реализация совокупности сведений, относящихся к предметной области и формально представленной таким образом, чтобы на их основе можно было проводить рассуждения [60].

Под методикой построения БЗ КИИС понимается совокупность приемов, правил и процедур, применяемых в определенной логической последовательности для разработки модели знаний по восстановлению работоспособности средств и ее программной реализации. Модель знаний предназначена для описания в памяти ЭВМ (КИИС) системы взаимосвязанных правил вида "ЕСЛИ, ТО ...".

### **2.1. Обоснование модели знаний по защите от антропогенных частиц**

Известно [31, 61, 62], что применяемый формализм предопределяет возможности использования различных типов знаний, а также свойства, характеристики БЗ и в целом КИИС. Главным требованием при этом остаются соответствие компонент и структуры модели - свойствам предметной области.

**Представление знаний** — это формализация убеждений посредством схем, записей или языков. В контексте решаемой истинных задачи, однако, термин представления знаний предполагает не только формализацию для запоминания, но и автоматическое извлечение знаний для вывода умозаключений на их основе. Практическое представление знаний осуществляется с помощью модели представления знаний..

**Модель знаний** — это формальная система, позволяющая записывать, хранить и автоматически использовать экспертные эвристики и другую информацию, которая необходима для решения стоящих в предметной области задач.

В качестве основы для представления знаний выбрана таблица решений, реализующая описанные в документации и экспертные знания по применению барьеров безопасности, обеспечению безопасности и заданных режимов функционирования КА.

Матрицей знаний назовем таблицу, сформированную по следующим правилам (см. табл.2.1):

1. Размерность этой матрицы равна  $(n+2) \times N$ , где  $(n+2)$ -число столбцов, а  $N=k_1+k_2+\dots+k_m$ -число строк.
2. Первые  $n$  столбцов матрицы соответствуют наблюдаемым параметрам  $x_i$ ,  $i=1..n$ ,  $(n+1)$ -ый столбец соответствует прогнозируемому повреждению  $d_j$  ( $j=1..m$ ), а  $(n+2)$ -ый столбец соответствует реализованному барьеру безопасности  $s_v$  ( $v=1..k$ ) для предотвращению или максимальной защиты при  $d_j$ .

Таблица 2.1 – Структура матрицы знаний

Номер входной комбинации значений параметров	Параметры ситуационные			Критерий повреждения	Барьер безопасности
	$x_1$	$\dots x_i \dots$	$\dots x_n$		
11	$a_1^{11}$	$a_i^{11}$	$a_n^{11}$	$d_1$	$S_{11}$
12	$a_1^{12}$	$a_i^{12}$	$a_n^{12}$		....
...					
$1k_1$	$a_1^{k_1}$	$a_i^{k_1}$	$a_n^{k_1}$		$S_{1v}$
...					...
$j1$	$a_1^{j1}$	$a_i^{j1}$	$a_n^{j1}$	$d_j$	$S_{j1}$
$j2$	$a_1^{j2}$	$a_i^{j2}$	$a_n^{j2}$		....
...					
$jk_j$	$a_1^{jk_j}$	$a_i^{jk_j}$	$a_n^{jk_j}$		$S_{jv}$
...	...	....	....	....	....
$m1$	$a_1^{m1}$	$a_i^{m1}$	$a_n^{m1}$	$d_m$	$S_{m1}$
$m2$	$a_1^{m2}$	$a_i^{m2}$	$a_n^{m2}$		
...					
$mk_m$	$a_1^{mk_m}$	$a_i^{mk_m}$	$a_n^{mk_m}$		$S_{mv}$

3. Каждая строка матрицы представляет некоторую комбинацию значений параметров, отнесенную к одному из возможных критериев повреждения. При этом: первые  $k_1$  строк соответствуют  $d_1$ , вторые  $k_2$  - строк  $d_2$ , ... последние  $k_m$  строк – соответствуют  $d_m$

4. Элемент  $a_i^{jp}$ , стоящий на пересечении  $i$ -го столбца и  $jp$ -й строки соответствует лингвистической оценке параметра  $x_i$  в строке нечеткой базы знаний с номером  $jp$ . При этом лингвистическая оценка  $a_i^{jp}$  выбирается из терм-множества, соответствующего переменной  $x_i$ , т.е.  $a_i^{jp} \in A_i$ ,  $i=1 \dots n$ ,  $j=1 \dots m$ ,  $p=1 \dots k_j$ .

Введенная матрица знаний определяет систему логических высказываний типа <ЕСЛИ-ТО, ИНАЧЕ>, связывающих значения входных параметров  $x_1 \dots x_n$  с одним из возможных критериев повреждения  $d_j$ ,  $j=1 \dots m$  и возможным барьером безопасности  $s_v$ :

ЕСЛИ  $(x_1=a_1^{11})$  И  $(x_2=a_2^{11})$  И ... И  $(x_n=a_n^{11})$

ИЛИ

$(x_1=a_1^{12})$  И  $(x_2=a_2^{12})$  И ... И  $(x_n=a_n^{12})$

ИЛИ

...

ИЛИ

$(x_1=a_1^{1k_1})$  И  $(x_2=a_2^{1k_1})$  И ... И  $(x_n=a_n^{1k_1})$

ТО  $y=(d_1, s_{11}, \dots, s_{1v})$

ИНАЧЕ

ЕСЛИ  $(x_1=a_1^{21})$  И  $(x_2=a_2^{21})$  И ... И  $(x_n=a_n^{21})$

ИЛИ

$(x_1=a_1^{22})$  И  $(x_2=a_2^{22})$  И ... И  $(x_n=a_n^{22})$

ИЛИ

...

ИЛИ

$(x_1=a_1^{2k_1})$  И  $(x_2=a_2^{2k_1})$  И ... И  $(x_n=a_n^{2k_1})$

ТО  $y=(d_2, s_{21}, \dots, s_{2v})$ ,

ИНАЧЕ

ЕСЛИ  $(x_1=a_1^{m1})$  И  $(x_2=a_2^{m1})$  И ... И  $(x_n=a_n^{m1})$

ИЛИ



$$(x_1=a_1^{m_2}) \text{ И } (x_2=a_2^{m_2}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n=a_n^{m_2})$$

ИЛИ

...

ИЛИ

$$(x_1=a_1^{m_{k1}}) \text{ И } (x_2=a_2^{m_{k1}}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n=a_n^{m_{k1}})$$

$$\text{ТО } y=(d_m, s_{m1}, \dots, s_{mv}),$$

где  $y=(d_j, s_{j1}, \dots, s_{jv})$  – прогноз по повреждению из множества  $D$  и барьеры безопасности из множества  $S$ , соответствующие защите для этого повреждения  $j=1 \dots m$ ,  $s=1 \dots v$ ;

$a_i^{jp}$  – лингвистическая оценка входной переменной  $x_i$   $p$ -й строке  $j$ -ой дизъюнкции, выбираемая из соответствующего терм-множества  $A_i$ ,  $i=1 \dots n, j=1 \dots m, p=1 \dots k_j$ ;

$k_j$ - количество правил, определяющих прогноз  $y=d_j$ ,  $j=1 \dots m$

Такая система логических высказываний называется *нечеткой базой знаний* [64].

Представленная база знаний охватывает две предметные области:

1. Прогнозирование результатов воздействия АЧ на КА;
2. Оценка и выбор барьера безопасности, соответствующий

прогнозируемому повреждению.

Обе задачи являются логически связанными и предполагают проведение выбора на множестве возможных альтернатив.

Базируясь на введенной матрице знаний логические высказывания о взаимосвязи входных параметров  $x_i$  и выходной переменной  $d_j$  с использованием операций  $\cup$  (ИЛИ) и  $\cap$  (И) могут быть представлены:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[ \bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right] \rightarrow d_j, \quad j=1 \dots m, \quad (2.1)$$

Для прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц составляются нечеткие логические уравнения, решением которых являются значения функций принадлежности критерия повреждения КА при фиксированных значениях входных переменных. Критерий повреждения

имеющий наибольшее значение функции принадлежности выбирается в качестве искомого решения  $d_j$ .

Нечеткие логические уравнения соответствуют нечеткой базе знаний и получены путем замены лингвистических термов  $a_i^{jp}$  и  $d_j$  на соответствующие функции принадлежности, а операций  $\cup$  и  $\cap$  - на операции  $\vee$  и  $\wedge$ :

$$\begin{aligned} \mu^{d_1}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \mu^{a_1^{11}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{11}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{11}}(x_n) \vee \\ &\vee \mu^{a_1^{12}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{12}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{12}}(x_n) \vee \dots \\ &\vee \mu^{a_1^{1k_1}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{1k_1}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{1k_1}}(x_n), \\ \mu^{d_2}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \mu^{a_1^{21}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{21}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{21}}(x_n) \vee \\ &\vee \mu^{a_1^{22}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{22}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{22}}(x_n) \vee \dots \\ &\vee \mu^{a_1^{2k_1}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{2k_1}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{2k_1}}(x_n), \end{aligned} \quad (2.2.)$$

...

$$\begin{aligned} \mu^{d_m}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \mu^{a_1^{m1}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{m1}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{m1}}(x_n) \vee \\ &\vee \mu^{a_1^{m2}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{m2}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{m2}}(x_n) \vee \dots \\ &\vee \mu^{a_1^{mk_1}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{mk_1}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{mk_1}}(x_n), \end{aligned}$$

где  $\vee$  - логическое ИЛИ,  $\wedge$  - логическое И.

Кратко систему логических уравнений можно записать следующим образом:

$$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{p=1}^{k_j} \left[ \bigwedge_{i=1}^n \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right], j = \overline{1, m} \quad (2.3)$$

Алгоритм прогнозирования результатов воздействия

Значение  $d^* \in D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$  (для каждого элемента КА), которое соответствует вектору фиксированных значений входных переменных  $X^* = \langle x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^* \rangle$  будем определять в следующей последовательности:

1°. Зафиксируем вектор значений входных переменных

$$X^* = \langle x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^* \rangle.$$

2°. Зададим функции принадлежности нечетких термов, используемых в нечеткой базе знаний и определим значения этих функций для заданных значений входных переменных  $x_1^* \dots x_n^*$ .

3°. Используя логические уравнения вычислить многомерные функции принадлежности  $\mu^{d_j}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  вектора  $X^*$  для всех значений  $d_j, j=1 \dots n$ . При этом логические операции И ( $\wedge$ ) и ИЛИ ( $\vee$ ) над функциями принадлежности заменяются на операции  $\min$  и  $\max$ :

$$\mu(a) \wedge \mu(b) = \min [\mu(a), \mu(b)],$$

$$\mu(a) \vee \mu(b) = \max [\mu(a), \mu(b)].$$

4°. Определить значение  $d_j^*$  для которой значение функции принадлежности максимально:

$$\mu^{d_j^*}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max_{j=1 \dots m} \left( \mu^{d_j}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \right). \quad (2.4.)$$

Это и будет искомым значением  $d_j$  для вектора значений входных переменных  $X^* = \langle x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^* \rangle$ .

Таким образом, алгоритм использует идею идентификации лингвистического термина по максимуму функции принадлежности и обобщает эту идею на всю матрицу знаний [64].

Нейронные сети и нечеткая логика - принципиально различные математические конструкции являются универсальными аппроксиматорами сложных (нелинейных) функциональных зависимостей во многих интеллектуальных задачах кибернетики: прогнозировании, диагностике, распознавании образов и др.

Главной особенностью нейронных сетей является их способность к обучению. Она реализуется с помощью специально разработанных алгоритмов, среди которых наиболее популярно правило обратного распространения ошибки (back-propagation) [65]. Для обучения нейронной сети не требуется никакой априорной информации о структуре искомой функциональной зависимости. Нужна лишь обучающая выборка в виде экспериментальных пар <входы-выход>. Платой за это является то, что

обученная нейронная сеть - граф со взвешенными дугами - не поддается содержательной интерпретации.

Достоинством нечеткой логики является возможность использования знаний о структуре объекта в виде лингвистических высказываний: если <входы>, то <выход>. Однако аппарат нечеткой логики не содержит механизмов обучения. Поэтому результаты нечеткого логического вывода сильно зависят от вида функций принадлежности, которыми формализуются нечеткие термы: <малый>, <высокий>, <медленный>, <надежный> и т. п.

Объединение нечеткой логики с нейронными сетями дает принципиально новое качество. Получаемая в результате такого объединения нейро-нечеткая сеть обладает двумя важнейшими человеческими (интеллектуальными) свойствами: а) *лингвистичностью*, т.е. использованием знаний на естественном языке; б) *обучаемостью* в реальном масштабе времени.

Нечеткие логические рассуждения, представлены в виде нейро-нечеткой сети (ННС), изоморфной базе знаний в которой:

- функции принадлежности, определяющие заданные нечеткие множества, рассматриваются как функции активации нейронов;
- передача параметров, как связи единичного уровня;
- логические t-нормы и s-нормы, как специальные виды нейронов, выполняющие математические операции  $\min$  и  $\max$ , Таблица 2.1.

Структура НН-сети представлена на рис. 2.1

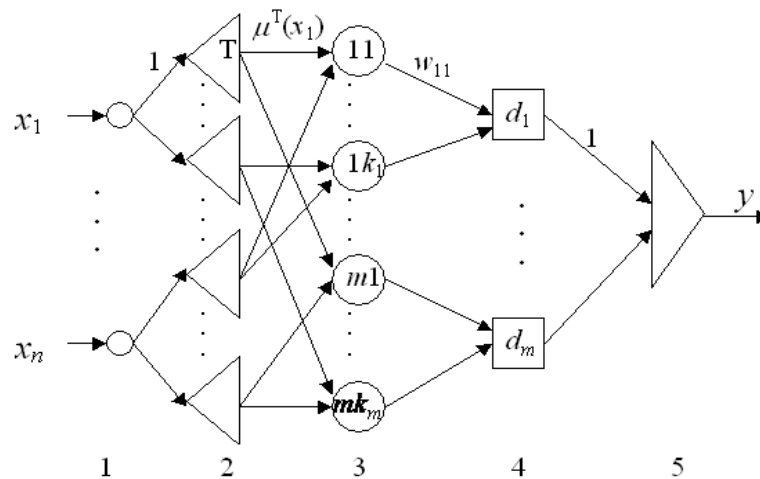


Рис.2.1- Структура НН-сети прогнозирования результатов воздействия АЧ

Таблица 2.2–Соответствие элементов ННС структуре БЗ

Узел	Название	Функция
	Вход	$v = u$
	Нечеткий терм	$v = \mu^T(u)$
	Нечеткое правило	$v = \prod_{i=1}^l u_i$
	Класс правил	$v = \sum_{i=1}^l u_i$
	Дефаззификация	$v = \frac{\sum_{j=1}^m u_j \bar{d}_j}{\sum_{j=1}^m u_j}$

При определении элементов *нечеткое правило* и *класс правил*, входящих в табл. 2.2, нечетко-логические операции *min* и *max* из формулы (2.3) заменены арифметическими операциями умножения и сложения. Возможность такой замены обоснована в работе [66]. Это позволяет получить аналитические выражения, удобные для дифференцирования.

Число узлов в ННС определяется:

- слой 1 - по количеству входных параметров;
- слой 2 - по количеству термов для параметров в базе знаний;
- слой 3 - по количеству правил в базе знаний;
- слой 4 - по количеству выделенных критериев повреждения;

слой 5 – слой формирующий ошибку прогноза.

Дуги графа взвешиваются следующим образом:

- единицей - дуги между 1-м и 2-м слоями;
- функциями принадлежности входа к нечеткому терму - дуги между 2-м и 3-м слоями;
- весами правил - дуги между 3-м и 4-м слоями
- единицей - дуги между 4-м и 5-м слоями.

## 2.2. Алгоритм обучения базы знаний прогнозированию результатов воздействия антропогенных частиц

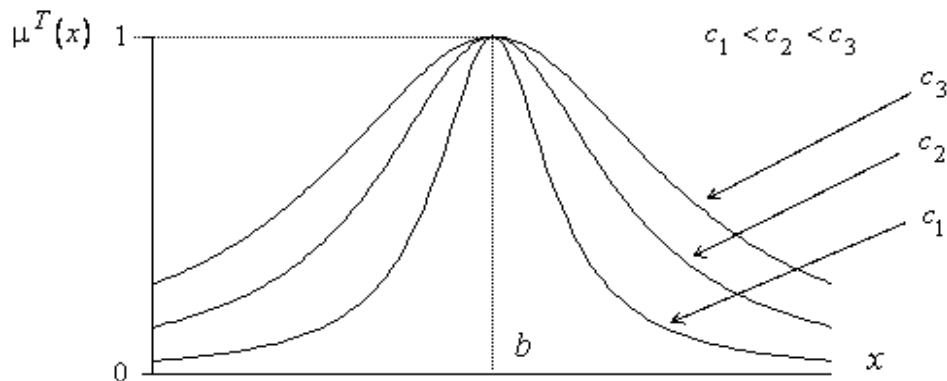
По определению [67] функции принадлежности  $\mu^T(x)$  характеризует субъективную меру (в диапазоне  $[0,1]$ ) уверенности эксперта в том, что четкое значение  $x$  соответствует нечеткому терму  $T$ . Наибольшее распространение в практических приложениях [68] получили треугольные, трапециевидные и колоколообразные (гауссовы) функции принадлежности, параметры которых позволяют изменять форму функций.

В общем случае функции принадлежности могут быть получены специально разработанными методами, наибольшее распространение получили: метод статистической обработки экспертной информации и метод парных сравнений. В исследовании основу составляет методика [69], основанная на известном положении о том, что для экспертных оценок вид графика функции более важен, чем отдельные пусть даже достаточно точные, её значения в конкретных точках. Суть методики [70] заключается в том, что для аппроксимации функций принадлежности используются её значения в экстремальных точках. На основе формулы

$$\mu(x_i) = \frac{1}{1 + \left[ \frac{x_i - b_i}{c_i} \right]^2} \quad (2.5)$$

строится выражение для функции, график которой проходит через вышеупомянутые точки (либо в непосредственной близости от них), что достигается путём подбора коэффициентов  $c$ ,  $b$  (параметров настройки):  $b$ -

координата максимума функции,  $\mu^T(b)=1$ ;  $c$  - коэффициент концентрации-растяжения функции.



Для нечеткого термина число  $b$  представляет наиболее возможное значение параметра  $x_i$ .

К достоинству изложенного подхода следует отнести небольшое (для многих практических задач оценки 3...5 [71] потребное количество опорных точек, в которых эксперты достоверно указали принадлежность или не принадлежность, или которые имеют максимальную неопределенность факта указанной принадлежности. Окончательное решение эксперты принимают на основе анализа вида графика функции принадлежности  $\mu(x_i)$ .

Выбор формы функции принадлежности обусловлен тем, что она достаточно хорошо описывает зависимости, полученные методом статистической обработки экспертной информации для оценки параметров взаимодействия КА и АЧ.

Значимость (важность) каждого правила ЕСЛИ-ТО, входящего в матрицу знаний (2.1), может быть различной. Для отражения значимости правил составляющих БЗ в исследовании введены их веса.

Определение. Весом правила называется число в интервале  $[0,1]$ , которое характеризует субъективную меру уверенности в этом правиле.

С учетом весов правил, матрица знаний (2.1.) примет следующий вид:

Если  $[(x_1=a_1^{11}) \text{ и } (x_2=a_2^{11}) \text{ и } \dots \text{ и } (x_n=a_n^{11})]$  (с весом  $w_{j1}$ )

Или  $[(x_1=a_1^{12}) \text{ и } (x_2=a_2^{12}) \text{ и } \dots \text{ и } (x_n=a_n^{12})]$  (с весом  $w_{j2}$ ) ....

....Или  $[(x_1=a_1^{lk_1}) \text{ и } (x_2=a_2^{lk_1}) \text{ и } \dots (x_n=a_n^{lk_1})]$  (с весом  $w_{jk_j}$ )

То  $y=d_j \in D$  для всех  $j=1..m$ , (2.6)

где  $a_i^{jp}$  - лингвистический терм, которым оценивается переменная  $x_i$  в строке с номером  $p=1..k_j$ ;

$k_j$ - количество строчек конъюнкций, соответствующих критерию  $d_j$ ,  $j=1..m$ ;

$w_{jp}$ -число в диапазоне  $[0,1]$ , которое характеризует вес высказывания с номером  $jp$ .

Модифицированной модели знаний (2.3) будет соответствовать следующая система нечетких логических уравнений:

$$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{p=1}^{k_j} \left\{ w_{jp} \wedge \left[ \bigwedge_{i=1}^n \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right] \right\}, \quad j = \overline{1, m}$$

где  $\bigvee$  ( $\wedge$ ) - операция из s-нормы (t-нормы), т.е. из множества реализаций логической операций ИЛИ (И). Наиболее часто используются следующие реализации: для операции ИЛИ - нахождение максимума и для операции И – нахождение минимума.

Учитывая то, что операциям  $\bigvee$  и  $\wedge$  в теории нечетких множеств соответствуют операции *min* и *max* из получим:

$$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max_{p=1, k_j} \left\{ w_{jp} \min_{i=1, n} \left[ \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right] \right\}, \quad j = \overline{1, m} \quad (2.6.)$$

После введения весов правил, в алгоритме прогнозирования (2.3) меняются соотношения для расчета выходных функций принадлежности.

Обучение базы знаний прогнозированию результатов воздействия АЧ будет определяться качеством настройкой нейро - нечеткой сети (НН-сети).

При использовании экспертных оценок в качестве параметров НН-сети не удастся добиться ее правильной работы. Обучение же БЗ экспертным путем потребует значительных затрат времени и сил и не обязательно будет успешной, а при достаточно большой размерности - практически невозможно за приемлемое время.



В литературе по теории искусственных нейронных сетей определяется, что для их обучения требуются экспериментальные данные.

В общем случае настройку НН- сети можно рассматривать как задачу настройки имеющимися данными проведенных испытаний (Приложение 2).

Соотношение (2.6) позволяет вычислить вектор функций принадлежности множества параметров (X) к различным повреждениям  $d_j$ :

$$\mu^{d_j}(X, W, B, C), j=1...m, \quad (2.7)$$

где X, W, B и C - векторы, введенные ранее.

Исходные данные методики:

- сформированная на основе экспертных оценок нейро - нечеткая сеть, реализующая прогноз возможных результатов воздействия АЧ;

- имеющаяся выборка в виде M - пар экспериментальных данных:

$$(X^L, d^L), L=1 \dots M, \quad (2.8)$$

где  $X^L=(x_1^L, x_2^L, \dots, x_n^L)$  и  $d^L$  - вектор параметров и соответствующий им критерий повреждения для L-ой пары “ситуация-повреждение КА”,  $d^L \in \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ .

Определим эталонный вектор функции принадлежности  $D^*$  следующим образом:

(1,0,...,0) для повреждения  $d_1$

(0,1 ,...,0) для повреждения  $d_2$

.....

(0,0,..., 1) для повреждения  $d_m$  (2.9)

Для нахождения вектора неизвестных параметров (W,B,C), который минимизирует разницу между результатом на модели (2.8) и существующей практикой (2.9) воспользуемся методом наименьших квадратов.

Задачу обучения БЗ сформулируем следующим образом: найти вектор (W,B,C), который удовлетворяет ограничениям

$$w_i = [\underline{w}_i, \overline{w}_i], i = 1..n, b_j = [\underline{b}_j, \overline{b}_j], c_j = [\underline{c}_j, \overline{c}_j], j = 1..q$$

и обеспечивает соответствие результатов прогноза, полученных для модели имеющимся данным по проведенным испытаниям.

Таблица 2.3 Результаты обучения НН-сети

Номер правила	ЕСЛИ			Вес	ТО
	x1	...xi..	xn		
11	$(b1^{11}, c1^{11})$	$(bi^{11}, ci^{11})$	$(bn^{11}, cn^{11})$	$w_{11}$	$d_1$
12	$(b1^{12}, c1^{12})$	$(bi^{12}, ci^{12})$	$(bn^{12}, cn^{12})$	$w_{12}$	
				....	
$lk_1$	$(b1^{lk_1}, c1^{lk_1})$	$(bi^{lk_1}, ci^{lk_1})$	$(bn^{lk_1}, cn^{lk_1})$	$w_{lk_1}$	
...	...	....	...	....	....
$j1$	$(b1^{j1}, c1^{j1})$	$(bi^{j1}, ci^{j1})$	$(bn^{j1}, cn^{j1})$	$w_{j1}$	$d_j$
$j2$	$(b1^{j2}, c1^{j2})$	$(bi^{j2}, ci^{j2})$	$(bn^{j2}, cn^{j2})$	$w_{j2}$	
...	...	....	...	....	
$jk_j$	$(b1^{jk_j}, c1^{jk_j})$	$(bi^{jk_j}, ci^{jk_j})$	$(bn^{jk_j}, cn^{jk_j})$	$w_{jk_j}$	
...	...	....	...	....	....
$m1$	$(b1^{m1}, c1^{m1})$	$(bi^{m1}, ci^{m1})$	$(bn^{m1}, cn^{m1})$	$w_{m1}$	$d_m$
$m2$	$(b1^{m2}, c1^{m2})$	$(bi^{m2}, ci^{m2})$	$(bn^{m2}, cn^{m2})$	$w_{m2}$	
...	...	....	...	....	
$mk_m$	$(b1^{mk_m}, c1^{mk_m})$	$(bi^{mk_m}, ci^{mk_m})$	$(bn^{mk_m}, cn^{mk_m})$	$w_{mk_m}$	

Для количественной оценки введем показатель точности прогноза по критерию  $d_j$  для текущего состояния взаимодействия (Q):

$$Q = \sum_{l=1}^M [\sum_{j=1}^m [\mu^{d_j}(X^l, W, B, C) - \mu^{d_j}(X^l)]^2] = \min_{W, B, C}$$

$$\text{где } \mu^{d_j}(X^l) = \begin{cases} 1, & d_j = d^l \\ 0, & d_j \neq d^l \end{cases}$$

В результате решения задачи должны быть рассчитаны:

1. Значения весов (w) для каждого правила;

2. Значения параметров функции принадлежности (b, c) для каждого термина, представленные в табл. 2.3 и достигнута ситуация соответствия результатов прогноза полученных на модели знаний данным по стендовым испытаниям. Решение такой задачи традиционными оптимизационными методами затруднительно в силу сложности, в тоже время большее применение для решения оптимизационных задач большой размерности получил градиентный метод обратного распространения ошибки. Анализ публикации с описанием успешного применения двойственных сетей [72, 73, 74], позволяют считать этот аппарат достаточно эффективным, что определило его применение для настройки НН-сети.

Обучение БЗ проводится методом обратного распространения ошибки с использованием двойственной сети, разработанной для ННС, которая представлена на рисунке 2.2.

В сети вычисляется градиент функции оценки по обучаемым параметрам настройки сети и градиент по входным сигналам сети. Используя градиент функции оценки по входным сигналам сети можно решать задачу обратной классификации по отношению к обучению нейронной сети.

Для сети разработаны три режима работы элементов. Первый режим – обычное прямое функционирование (рис. 2.3 а). Вторым режимом – нагруженное прямое функционирование (рис. 2.3 б верхняя цепочка). Третий режим – обратное функционирование.

При обычном прямом функционировании каждый элемент вычисляет выходную функцию от входных параметров и параметров сети и выдает ее на выход.

При нагруженном прямом функционировании каждый элемент вычисляет выходную функцию от входных параметров и параметров сети и выдает ее на выход, кроме того, он вычисляет производные выходной функции по каждому входному параметру и параметру сети и запоминает их (блоки под элементами в верхней цепочке на рис. 2.3 б).

При обратном функционировании элементы исходной сети выдают на специальные выходы ранее вычисленные производные (связи между верхней и нижней цепочками на рис. 2.3 б), которые используются для вычисления градиентов по входным параметрам и параметрам сети двойственной сетью (нижняя цепочка на рис. 2.3 б).

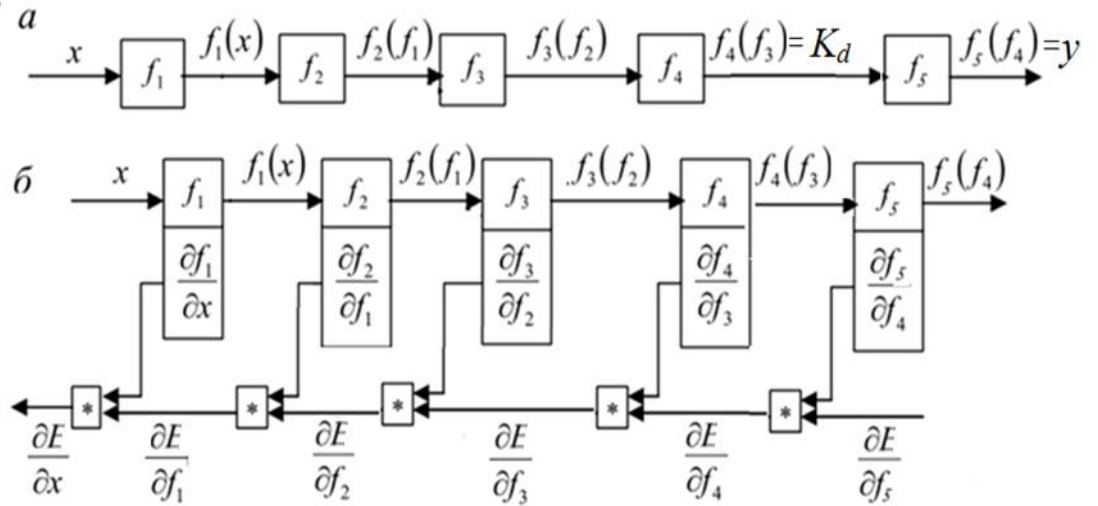


Рис.2.3 - Структура и режимы функционирования двойственной сети:

а - обычное прямое функционирование сети,

б - нагруженное прямое и обратное функционирование сети.

Для настройки использована функциональная зависимость:

$$y = \frac{\sum_{j=1}^m d_j \left[ \sum_{p=1}^l \left( w_p \cdot \left( \prod_{i=1}^n \mu^T(x_i) \right) \right) \right]_p}{\sum_{j=1}^m \left[ \sum_{p=1}^l \left( w_p \cdot \left( \prod_{i=1}^n \mu^T(x_i) \right) \right) \right]_p} \quad (2.9.),$$

Отличительной особенностью алгоритма является то, что метод обратного распространения ошибки при обучении ННС последовательно применяется в два этапа:

- для подстройки параметров сети при модификации её синаптического пространства, что позволяет настроить БЗ по имеющимся примерам. Для настройки используется система рекуррентных соотношений:

$$\begin{aligned} w_{jp}(t+1) &= w_{jp}(t) - h \frac{\partial E_t}{\partial w_{jp}(t)}; & c_i^{jp}(t+1) &= c_i^{jp}(t) - h \frac{\partial E_t}{\partial c_i^{jp}(t)}; \\ b_i^{jp}(t+1) &= b_i^{jp}(t) - h \frac{\partial E_t}{\partial b_i^{jp}(t)}; \end{aligned} \quad (2.10)$$

- для подстройки входного вектора, через градиент функции ошибки по входным параметрам сети, что позволяет подбирать на входе сети новые

сочетания значений параметров (примеры), для которых остается истинным выбранный критерий повреждения.

Для настройки используется рекуррентное соотношение:

$$x_i(t+1) = \frac{\sum_{T=1}^{a_i} \mu^T(x_i(t)) \cdot \left( b_i(t) - h \frac{\partial E_t}{\partial x_i(t)} \right)}{\sum_{T=1}^{a_i} \mu^T(x_i(t))}, \quad (2.11)$$

при заданном критерии минимизации ошибки на выходе  $E_t = \frac{1}{2}(\hat{y}_t - y_t)^2$ ,

где:  $\hat{y}_t$  и  $y_t$  - теоретический и экспериментальный выходы сети на t-м шаге обучения,  $x_i, w_{jp}, c_i^{jp}, b_i^{jp}$  - значения входных параметров, весов правил и параметров функций принадлежности на t-м шаге обучения,  $h$  - параметр обучения.

Частные производные, входящие в соотношения, характеризуют чувствительность ошибки ( $E_t$ ) к изменению параметров ННС, входных параметров и вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_t}{\partial w_{jp}} &= \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \frac{\partial \mu^{d_j}(y)}{\partial w_{jp}} \\ \frac{\partial E_t}{\partial c_i^{jp}} &= \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \frac{\partial \mu^{jp}(x_i)}{\partial c_i^{jp}} \\ \frac{\partial E_t}{\partial b_i^{jp}} &= \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \frac{\partial \mu^{jp}(x_i)}{\partial b_i^{jp}} \\ \frac{\partial E_t}{\partial x_i} &= \frac{\partial \mu^{jp}(x_i)}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (2.12)$$

где:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial E_t}{\partial y} = y_t - \hat{y}_t$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\partial y}{\partial \mu^{d_j}(y)} = \frac{j \sum_{j=1}^m \mu^{d_j}(y) - \sum_{j=1}^m j \mu^{d_j}(y)}{\left( \sum_{j=1}^m \mu^{d_j}(y) \right)^2}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\partial \mu^{jp}(y)}{\partial \left( \prod_{i=1}^n \mu^{jp}(x_i) \right)} = w_{jp}$$

$$\varepsilon_4 = \frac{\partial \left( \prod_{i=1}^n \mu^{jp}(x_i) \right)}{\partial \mu^{jp}(x_i)} = \frac{1}{\mu^{jp}(x_i)} \prod_{i=1}^n \mu^{jp}(x_i)$$

$$\frac{\partial \mu^{d_j}(y)}{\partial w_{jp}} = \prod_{i=1}^n \mu^{jp}(x_i)$$

$$\frac{\partial \mu^{jp}(x_i)}{\partial c_i^{jp}} = \frac{2c_i^{jp}(x_i - b_i^{jp})^2}{\left( (c_i^{jp})^2 + (x_i - b_i^{jp})^2 \right)^2}$$

$$\frac{\partial \mu^{jp}(x_i)}{\partial b_i^{jp}} = \frac{2(c_i^{jp})^2(x_i - b_i^{jp})}{\left( (c_i^{jp})^2 + (x_i - b_i^{jp})^2 \right)^2}$$

$$\frac{\partial \mu^{jp}(x_i)}{\partial x_i} = -\frac{2(c_i^{jp})^2(x_i - b_i^{jp})}{\left( (c_i^{jp})^2 + (x_i - b_i^{jp})^2 \right)^2}$$

Алгоритм обучения нейро-нечеткой сети включает два этапа. На первом этапе вычисляется значение выхода (y), соответствующее заданной архитектуре сети, формируется значение невязки ( $E_t$ ) и по расчетным формулам пересчитываются веса межнейронных связей. На втором этапе по вновь вычисленному значению невязки ( $E_t$ ), при фиксированных весах межнейронных связей пересчитываются входные параметры, для осуществляя обратный вывод для формирования новых наборов данных (примеров) по каждому критерию повреждения.

Таким образом, обучение БЗ заключается в построении матрицы, которая, удовлетворяя ограничениям на диапазоны изменения входных параметров (X), параметров нейро-нечеткой сети (W,B,C) и количество

строк-правил, обеспечивает по всем примерам из обучающей выборки последовательное выполнение критериев:

1.  $\sum_{p=1}^M \left[ \mu^{d_j}(X_p, W, B, C) - \mu^{d_j}_p \right]^2 = \min_{W, B, C}$  – обучение синаптической карты НН-сети
2.  $\sum_{p=1}^M \left[ \mu^{d_j}(X, W_p, B_p, C_p) - \mu^{d_j}_p \right]^2 = \min_X$  – обучение параметров на входе НН-сети

### **2.3. Оценка результатов обучения базы знаний прогнозированию результатов воздействия антропогенных частиц**

Показателями качества прогнозирования являются либо собственно вероятность ошибки, либо связанные с ней функции потерь. Различают условную вероятность ошибочного прогнозирования, ожидаемую ошибку на выборке заданного объема и асимптотическую ожидаемую ошибку прогнозирования. Функции потерь разделяют на функцию средних потерь, функцию ожидаемых потерь и эмпирическую функцию средних потерь.

Само понятие "ошибка прогноза" предполагает, что существует независимая от алгоритма информация, позволяющая достоверно определить к какому критерию повреждения приводит воздействие АЧ. Обычно (но не всегда) считается, что это выборка по испытаниям, проведенным для оценки результатов воздействия АЧ. На этой основе был сформулирован показатель качества прогнозирования повреждений, который можно назвать "степень соответствия результатов моделирования выборке данных по проведенным испытаниям".

Известны следующие экспериментальные методы оценки вероятности безошибочного прогнозирования:

1. Выборка используется одновременно как обучающая и контрольная;
2. Выборка разбивается на две части - обучающую и контрольную;
3. Из всей выборки случайным образом извлекается один объект, а по оставшимся настраиваются решающие правила и производится идентификация выбранного состояния. Процедура повторяется заданное

число раз (до полного перебора всех объектов обучающей выборки).

Первый способ дает завышенную оценку качества по сравнению с той же оценкой качества по независимым от обучения данным. Второй способ является самым простым и убедительным. Им широко пользуются, если экспериментальных данных достаточно. В то же время третий способ, называемый также методом скользящего экзамена, является наиболее предпочтительным, так как дает меньшую дисперсию оценки вероятности ошибки. Именно он выбран в проводимом исследовании.

Выберем  $Q$ -состояний (из выборки по проведенным испытаниям) используемых для тестирования задачи ( $Q < M$ ). Представим  $Q$ - состояний в виде дерева, показанного на рис. 2.4, где:

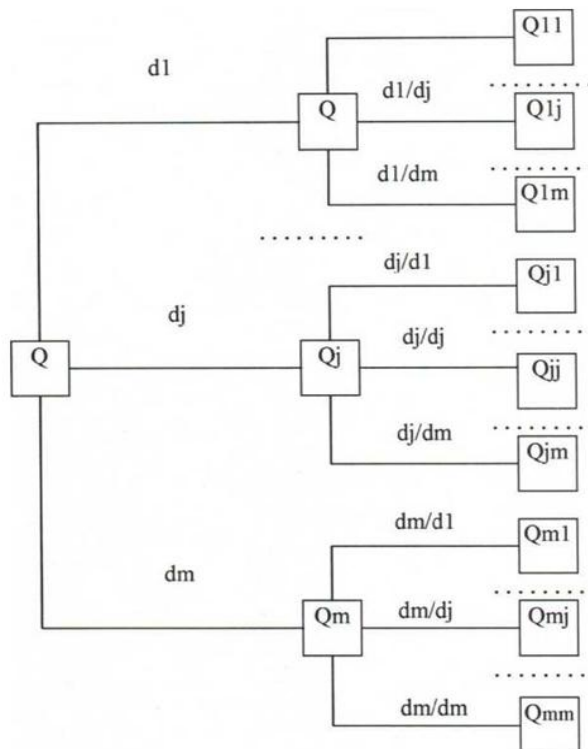


Рис.2.4 Дерево распределения точек тестирующей выборки

$Q$ - общее число состояний в выборке;

$Q_j$ -число состояний из выборки, по которым требуется решение  $y = d_j$ ,

т.е.  $Q = Q_1 + \dots + Q_j + \dots + Q_m$ ;

$Q_{ji}$ -число состояний, в которых требовалось решение  $y = d_j$  ( $j = 1 \dots m$ ), но получено решение  $d_i$  ( $i = 1 \dots m$ ), причем:



$$Q_j = Q_{j1} + \dots + Q_{ji} + \dots + Q_{jm}.$$

Тогда, для оценки результатов прогнозирования результатов воздействия АЧ находим

$$P_j = \frac{Q_{jj}}{Q_j}, \quad P_{ji} = \frac{Q_{ij}}{Q_j} \quad (2.13)$$

где  $P_j$  - вероятность безошибочного прогнозирования по критерию  $d_j$ ;

$P_{ji}$  - вероятность ошибочного прогноза о повреждении  $d_i$ , при условии объективной необходимости  $d_j$ .

Вероятность  $P_j$  характеризует ожидаемую относительную частоту безошибочного прогнозирования при тестировании БЗ, при предъявлении контрольного состояния для  $d_j$  и получаемого результата моделирования, соответствующего  $d_j$ .

Обобщенной характеристикой является осредненная вероятность безошибочного прогнозирования результатов воздействия АЧ в БЗ КИИС:

$$P^* = \frac{1}{Q} \sum_{j=1}^m Q_{jj} \quad (2.14)$$

Изменение указанных вероятностей (2.31-2.32) от объема данных по проведенным испытаниям позволяет оценить достоверность результатов прогнозирования после обучения базы знаний.

#### **2.4. Формализация параметров оценки барьера безопасности при воздействии антропогенных частиц**

В постановке научной задачи все барьеры безопасности, содержащиеся в БЗ, должны иметь однородные, универсальные параметрические описания в виде нечетких векторов (1.2). Применение параметров связано с проведением формализации, что требует разработки соответствующей процедуры. Целью параграфа является представление параметров оценок барьеров безопасности в виде нечетких множеств с использованием лингвистических переменных.

Метод парных сравнений Саати является одним из известных методов построения нечетких множеств [75]. Его реализация требует нахождения

собственного вектора матрицы парных сравнений, что связано со сложностью и громоздкостью проводимых вычислений для задач большой размерности.

Используемый в исследовании метод [76] не требует нахождения собственного вектора матрицы и лишен трудоемких процедур решения характеристических уравнений.

Рассмотрим лингвистическую переменную «Параметр», которая может принимать значения {оперативность, результативность и экономичность} на универсальном множестве альтернативных барьеров безопасности КА. Нечеткое множество, с помощью которого формализуется  $c_l$  - параметр оценки барьера ( $l=1...3$ ), представляет собой совокупность пар:

$$c_l = \left\{ \frac{\mu^l(s_1)}{s_1}, \frac{\mu^l(s_2)}{s_2} \dots \frac{\mu^l(s_v)}{s_v} \right\} \quad (2.15)$$

где  $S=\{s_1, s_2, \dots, s_v\}$  - универсальное множество альтернативных барьеров на котором задается нечеткое множество  $c_l$ ;

$\mu^l(s_v)$  - степень принадлежности элемента  $s_v$  нечеткому множеству  $c_l$ . Метод, который предлагается для решения поставленной задачи, базируется на идее распределения степеней принадлежности элементов универсального множества  $S_v$  согласно с их рангами. Эта идея использовалась в теории структурного анализа систем, где рассмотрены разные способы определения рангов элементов. Методика распределения надежности по элементам системы согласно рангов приведена в работе [77].

Под рангом элемента  $S_v$  понимается число  $r^l(s_v)$ , которое характеризует значимость этого элемента в формировании свойства, которое описывается нечетким термом  $c_l$ . Допущением является выполнение правила: чем больший ранг элемента, тем больше степень принадлежности. Введем обозначения:  $r^l(s_v) = r_v$ ,  $\mu^l(s_v) = \mu_v$ , где  $v=1...k$

Тогда правило распределения степеней принадлежности можно задать в виде соотношения:

$$\frac{\mu_1}{r_1} = \frac{\mu_2}{r_2} = \dots = \frac{\mu_v}{r_v} \quad (2.16)$$

для которого прибавляется условие нормирования:

$$\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_v = 1 \quad (2.17)$$

Используя соотношение (2.16), можно определить степени принадлежности всех элементов универсального множества через степень принадлежности опорного элемента.

Если опорным является элемент  $s_1$  с принадлежностью  $\mu_1$ , то

$$\mu_2 = \frac{r_2}{r_1} \mu_1, \mu_3 = \frac{r_3}{r_1} \mu_1, \dots, \mu_v = \frac{r_v}{r_1} \mu_1, \quad (2.18)$$

Для опорного элемента  $s_2$  с принадлежностью  $\mu_2$  получаем:

$$\mu_1 = \frac{r_1}{r_2} \mu_2, \mu_3 = \frac{r_3}{r_2} \mu_2, \dots, \mu_v = \frac{r_v}{r_2} \mu_2, \quad (2.19)$$

И наконец для опорного элемента  $s_v$  с принадлежностью  $\mu_v$  имеем:

$$\mu_1 = \frac{r_1}{r_v} \mu_v, \mu_3 = \frac{r_3}{r_v} \mu_v, \dots, \mu_{v-1} = \frac{r_{v-1}}{r_v} \mu_v, \quad (2.20)$$

Учитывая условие нормировки (2.17), из соотношения (2.18) - (2.20) находим:

$$\begin{cases} \mu_1 = \left[ 1 + \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_3}{r_1} + \dots + \frac{r_v}{r_1} \right]^{-1} \\ \mu_2 = \left[ \frac{r_1}{r_2} + 1 + \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{r_v}{r_2} \right]^{-1} \\ \dots \\ \mu_v = \left[ \frac{r_1}{r_v} + \frac{r_2}{r_v} + \frac{r_3}{r_v} + \dots + 1 \right]^{-1} \end{cases} \quad (2.21)$$

Формулы (2.21) дают возможность вычислять степени принадлежности  $\mu^l(S_v)$  элементов  $S_v$  к нечеткому терму  $c^l$  двумя независимыми путями:

1. По абсолютным оценкам уровней  $r_v$  ( $v=1, k$ ), которые определяются согласно методикам, предложенных в теории структурного

анализа систем [77]. Для экспертных оценок рангов можно использовать шкалу отношений (1 - наименьший ранг, 9 - наибольший ранг);

2. По относительным оценкам рангов  $r_i/r_j = a_{ij}$ ,  $i, j=1 \dots v$ , которые образуют матрицу

$$\begin{pmatrix} 1 + \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_3}{r_1} + \dots + \frac{r_v}{r_1} & & & \\ \frac{r_1}{r_2} + 1 + \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{r_v}{r_2} & & & \\ \dots & & & \\ \frac{r_1}{r_v} + \frac{r_2}{r_v} + \frac{r_3}{r_v} + \dots + 1 & & & \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Эта матрица обладает следующими свойствами:

А) она диагональная, т.е.  $a_{ii}=1$ ,  $i=1 \dots v$ ;

Б) элементы которые симметричные относительно главной диагонали, связаны зависимостью:  $a_{ij}=1/a_{ji}$ ;

В) она транзитивна, т.е.  $a_{ik} \cdot a_{kj} = a_{ij}$ , поскольку  $\frac{r_i}{r_k} \cdot \frac{r_k}{r_j} = \frac{r_i}{r_j}$ .

Указанные свойства позволяют при известных элементах одной строки матрицы (2.40) определять элементы всех других строк. Если известна  $i$ -я строка, т.е. элементы  $a_{ij}$  ( $k, j=1 \dots v$ ), то произвольный элемент  $a_{ij}$  находится так:

$$a_{ij} = a_{kj} / a_{ki}, \text{ где } i, j, k = 1 \dots v.$$

Поскольку матрица (2.22) может быть интерпретирована как матрица парных сравнений рангов, то для экспертных оценок элементов этой матрицы можно использовать 9-ти бальную шкалу Саати:  $a_{ij} = r_i/r_j$  [78].

Шкала формируется так:

1-отсутствие преимущества  $r_j$  над  $r_i$ ;

3- при слабом преимуществе  $r_j$  над  $r_i$ ;

5-при существенном преимуществе  $r_j$  над  $r_i$ ;

7-при явном преимуществе  $r_j$  над  $r_i$ ;

9—при абсолютном преимуществе  $r_j$  над  $r_i$ ;

2,4,6,8 — промежуточные сравнительные оценки.

Таким образом, с помощью полученных формул (2.16-2.22), экспертные знания о рангах элементов или их парные сравнения преобразуются в функцию принадлежности нечеткой переменной параметра оценки барьера безопасности.

Алгоритм построения функции принадлежности включает следующие этапы:

1. Определить название параметра как лингвистической переменной;
2. Определить универсальное множество (носитель) на котором задается переменная «Параметр»;
3. Определить количество значения переменной (термов) и их название;
4. Для каждого терма построить матрицу парных сравнений;
5. Рассчитать значения функции принадлежности для каждого терма и провести нормировку полученных значений.

Результатом этапа является представление всех значений параметров оценки способа в виде нечетких множеств с соответствующими функциями принадлежности и характеристическими значениями.

В качестве примера рассмотрим лингвистическую переменную «Продолжительность восстановления исходных данных (ИД) по АЧ, загружаемых в ОЗУ ЭВМ», которая будем оценивать нечеткими термами: Н - низкая; С - средняя; В - высокая, на универсальном множестве  $S = \{ s_1 - \text{смена ведущей ЭВМ без предварительного резервирования, } s_2 - \text{пересылка ИД между ЭВМ1 и ЭВМ2, } s_3 - \text{загрузка ИД с магнитной ленты, } s_4 - \text{загрузка ИД с магнитного барабана, } s_5 - \text{восстановление основных параметров ИД с распечаток и расчеты на их основе полных ИД} \}$ .

Матрицы (2.22) для каждого терма сформированы по относительным оценкам рангов с использованием 9-ти бальной шкалы Саати:

		S1	S2	S3	S4	S5			S1	S2	S3	S4	S5
H=	S1	1	7/9	5/9	3/9	1/9	B=	S1	1	3	5	7	9
	S2	9/7	1	5/7	3/7	1/7		S2	1/3	1	5/3	7/3	9/3

S3	9/5	7/5	1	3/5	1/5
S4	9/3	7/3	5/3	1	1/3
S5	9	7	5	3	1

S3	1/5	3/5	1	7/5	9/5
S4	1/7	3/7	5/7	1	9/7
S5	1/9	3/9	5/9	7/9	1

S1 S2 S3 S4 S5

C=

S1	1	7/5	9/5	7/5	1
S2	5/7	1	5/7	1	5/7
S3	5/9	7/9	1	7/9	5/9
S4	5/7	1	9/7	1	5/7
S5	1	7/5	9/5	7/5	1

После обработки этих матриц по формулам (2.21) получим функции принадлежности, которые в нормированном виде приведены на рис.2.5.

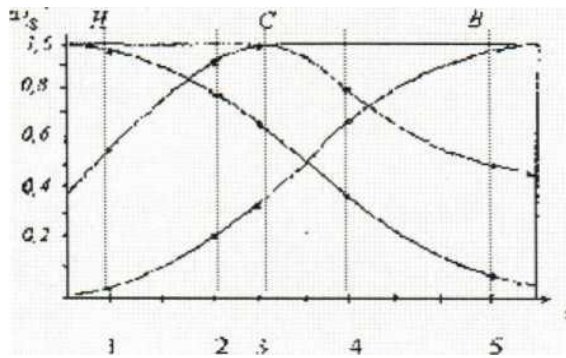


Рис. 2.5 Функции принадлежности нечетких множеств значений переменной «Продолжительность восстановления исходных данных по АЧ, загружаемых в ОЗУ ЭВМ».

## 2.5. Алгоритм оценки эффективности барьера безопасности при воздействии антропогенных частиц

Оценка эффективности барьера безопасности является многокритериальной задачей анализа. Известный подход к таким задачам связан с вычислением коэффициентов важности параметров и решение исходной многокритериальной задачи путем вычисления скалярной аддитивной функции множества взвешенных переменных [79].

Коэффициенты определяют вклад каждого параметров в интегральный показатель. Они определяются экспертами заблаговременно. Указанный подход не может быть реализован в автоматическом режиме и плохо приспособлен к качественным оценкам экспертов. Разработанный алгоритм основан на методе, который использует информацию в виде парных сравнений типа:

по оперативности - барьер 1 приблизительно такой же, как и барьер 3;

по результативности (надежности) барьер 2 лучше, чем барьер 3;

по экономичности барьер 3 намного лучше, чем барьер 2;

важность оперативности барьера намного выше, чем оперативность и экономичность и т.д.

Исходными данными являются алгоритма являются:

$S = \{s_1, s_2, \dots, s_v\}$  - множество альтернативных барьеров безопасности, которые могут рассматриваться для защиты от АЧ;

$C = \{c_1, c_2, c_3\}$  - множество параметров оценки барьера безопасности;

$F = (f_1, f_2, f_3)$  - показатели важности параметров оценки барьера, определяемые из условий обстановки.

Необходимо упорядочить барьеры из множества  $S$  по параметрам из множества  $C$  с учетом их важности  $F$  в реальном времени т.е. цикле работы бортового комплекса управления при обнаружении АЧ.

Пусть  $\mu^l(s_v)$  - число в диапазоне  $[0,1]$ , которое характеризует барьер  $s_v$  по параметру  $c_l$ : чем больше число  $\mu^l(s_v)$ , тем выше оценка барьера

безопасности по параметру  $c_l$ ,  $l=1...m$ .

Тогда параметр  $c_l$  можно представить в виде нечеткого множества, которое задано на универсальном множестве  $S$  в виде:

$$c_l = \left\{ \frac{\mu^l(s_1)}{s_1}, \frac{\mu^l(s_2)}{s_2}, \frac{\mu^l(s_3)}{s_3} \right\}, \quad (2.23)$$

где  $\mu^l(s_v)$  - степень принадлежности  $s_v$  к нечеткому множеству  $c_l$ .

Содержание этапов.

Первый этап. Для определения степени принадлежности из (2.23), заблаговременно, по каждому барьеру из множества  $S$ , сформируем матрицы парных сравнений по каждому параметру [76]. Общее количество матриц определяется количеством параметров и равняется  $l$ .

Для параметра  $c_l$  матрица парных сравнений имеет вид:

$$A^l = \begin{matrix} & s1 & s2 & sn \\ s1 & a_{11}^l & a_{12}^l & a_{1n}^l \\ s2 & a_{21}^l & a_{22}^l & a_{2n}^l \\ sn & a_{n1}^l & a_{n2}^l & a_{nn}^l \end{matrix}, \quad (2.24)$$

где элемент  $a_{ij}$  оценивается экспертом по 9-ти бальной шкалой Саати.

Знание матрицы (2.24) позволяет с использованием метода Саати проранжировать и упорядочить множество  $S$  по каждому параметру оценки  $c_l$ . Для получения первых приближений искомых характеристик рангов использована процедура, предложенная в [76], которая предполагает, что матрица (2.24) имеет следующие свойства:

-она диагональная т.е.  $a_{ii}=1$ ,  $i=1,..v$ ;- элементы, которые симметричны относительно главной диагонали, связаны зависимостью  $a_{ij}=1/a_{ji}$ ;

- она транзитивна, т.е.  $a_{ik}a_{kj}= a_{ij}$ .

Наличие этих свойств позволяет определить все элементы матрицы по элементам одной строки. Если известна  $k$ -тая строка, т.е. элементы  $a_{kj}$ , то произвольный элемент  $a_{ij}$  определяется:

$$a_{ij}^l = \frac{a_{kj}^l}{a_{ki}^l}, \quad i, j, k = \overline{1...v} \quad (2.25)$$



После определения всех элементов матрицы степени принадлежности, необходимые для формирования нечеткого множества (2.23), вычисляют по формуле:

$$\mu^l(s_v) = \frac{1}{a'_{v1} + a'_{v2} + \dots + a'_{vk}} \quad (2.26)$$

Базируясь на принципе Беллмана-Заде [81], наилучшим барьером безопасности является тот, который имеет гарантированную оценку по параметрам  $c1, c2, c3$ . Поэтому нечеткое множество, которое необходимо для получения оценки, определяется в виде пересечения (показатель эффективности барьера):

$$K_{sv} = c1 \cap c2 \cap c3 \quad (2.27)$$

Учитывая то, что в теории нечетких множеств операции пересечения соответствует  $\min$ , получаем:

$$K_s = \left\{ \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_1)}{s_1}, \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_2)}{s_2}, \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_v)}{s_v} \right\} \quad (2.28)$$

Наилучшим способом следует считать тот, для которого степень принадлежности (числитель) является наибольшей.

Второй этап. В условиях автономного орбитального функционирования КА особое значение приобретает оценка важности параметров барьера, которые отражают условия возможного столкновения. Требованием является автоматическое проведение оценки при анализе обстановки.

Пусть  $f_1, f_2, f_3$ - коэффициенты важности (или ранги) параметров барьера безопасности. Ранжирование методом парных сравнений напрямую становится невозможным в условиях автономного функционирования КА, т.к. эксперты напрямую не включены в цикл управления КА.

В реальном времени коэффициенты  $f_l$  могут быть получены в ходе решения системы нечетких логических уравнений [82]. Эти уравнения строятся на базе матрицы знаний или изоморфной ей системы логических высказываний о важности параметров барьера сформированной заранее,

которые позволяют вычислять значения функций принадлежности при фиксированных входных переменных.

Входные параметры:  $t_1$ -располагаемое до столкновения с АЧ и  $t_2$ -требуемое время на подключение барьера;  $n_1$ -имеющийся запас топлива на борту КА и  $n_2$ -его требуемый расход на подключение барьера,  $r_1$  - прогнозируемая вероятность повреждения КА и  $r_2$  - результативность (надежность) барьера, представляются лингвистическими переменными на ограниченном множестве значений  $\{H, C, B\}$ .

Выходными являются суждения, сформулированные на основе шкалы Саати.

Матрица знаний, формируется для каждого параметра по правилам [83]

1) Её размерность равна  $(n+1)N$ , где  $(n+1)$  - число столбцов, а  $N=k_1+k_2+\dots+k_m$ ,  $m$ - число строк.

2) Первые  $n$  столбцов матрицы соответствуют входным переменным, а  $(n+1)$ -ый столбец соответствует оценке по параметру барьера, представленной одной из формулировок шкалы Саати:

- отсутствие преимущества;
- слабое преимущество;
- существенное преимущество;
- явное преимущество;
- абсолютное преимущество;

3) Каждая строка матрицы представляет некоторую комбинацию значений входных переменных, отнесенную экспертом к одному из возможных значений выходной переменной. При этом: первые  $k_1$  строк соответствуют значению выходной переменной  $f_1$ , вторые  $k_2$  строк - значению  $f_2, \dots$ , последние  $k_m$  строк - значению  $f_m$ .

4) Элемент  $a_i^{jp}$ , стоящий на пересечении  $i$ -го столбца и  $jp$ -й строки соответствует лингвистической оценке важности параметра в строке матрицы знаний с номером  $jp$ . При этом лингвистическая оценка  $a_i^{jp}$

выбирается из терм-множества переменной  $x_i$ , т.е.  $a_i^{jp} \in A_i$ ,  $i=1 \dots n$ ,  $j=1 \dots m$ ,  $p=1 \dots k_j$ .

Нечеткие логические уравнения составлены путем замены лингвистических термов  $a_i^{jp}$  и  $f_l$  лингвистической оценки, соответствующими значениями функций принадлежности в строке матрицы знаний с номером  $jp$  для каждого параметра  $f_l$ .

Кратко систему логических уравнений можно записать следующим образом:

$$\mu^{f_l}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{p=1}^{k_j} \left[ \bigwedge_{i=1}^n \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right], l = \overline{1, m} \quad (2.29)$$

При вычислениях логические операции И ( $\wedge$ ) и ИЛИ ( $\vee$ ) над функциями принадлежности заменяются на операции  $\min$  и  $\max$ :

$$\mu^{f_l}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max_{p=1, k_j} \left\{ \min_{i=1, n} \left( \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right) \right\}, j = \overline{1, m} \quad (2.30)$$

С использованием шкалы Саати определим значение балльных оценок каждого параметра, соответствующее наибольшему значению функции принадлежности:

Полученный вывод	Значение в баллах
отсутствие преимущества	1
слабое преимущество	3
существенное преимущество	5
явное преимущество	7
абсолютное преимущество	9

Составим матрицу парных сравнений, которая имеет вид:

$$\begin{array}{cccc} & c_1 & c_2 & c_n \\ c_1 & a_{11}^l & a_{12}^l & a_{1n}^l \\ c_2 & a_{21}^l & a_{22}^l & a_{2n}^l \\ c_n & a_{n1}^l & a_{n2}^l & a_{nn}^l \end{array}$$

После определения всех элементов матрицы с использованием формулы (2.26) рассчитаем значения функции принадлежности для определения коэффициентов  $f_l$ .

При наличии коэффициентов важности  $f_l$ ,  $l=1 \dots 3$  формула (2.28) имеет вид:

$$K_s = \left\{ \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_1)^{f_l}}{s_1}, \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_2)^{f_l}}{s_2}, \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_v)^{f_l}}{s_v} \right\} \quad (2.31)$$

где степень  $f_l$  свидетельствует о концентрации нечеткого множества в соответствие с мерой важности параметра  $c_l$ .

Алгоритм решения задачи включает:

1. Рассмотрение параметров оценки барьеров как нечетких множеств, которые заданы на универсальном множестве барьеров безопасности с помощью функций принадлежности.

2. Определение функций принадлежности нечетких множеств на основе экспертной информации о парных сравнениях барьеров безопасности с помощью 9-ти бальной шкалы Саати.

3. Оценка эффективности барьеров безопасности на основе пересечения нечетких множеств (принцип Беллмана-Заде).

4. Оценка важности параметров барьера с использованием БЗ важности параметров, проведения нечеткого логического вывода и учет полученных весов как степеней концентрации соответствующих функций принадлежности.

5. Оценка эффективности и выбор барьера безопасности с учетом складывающейся обстановки.

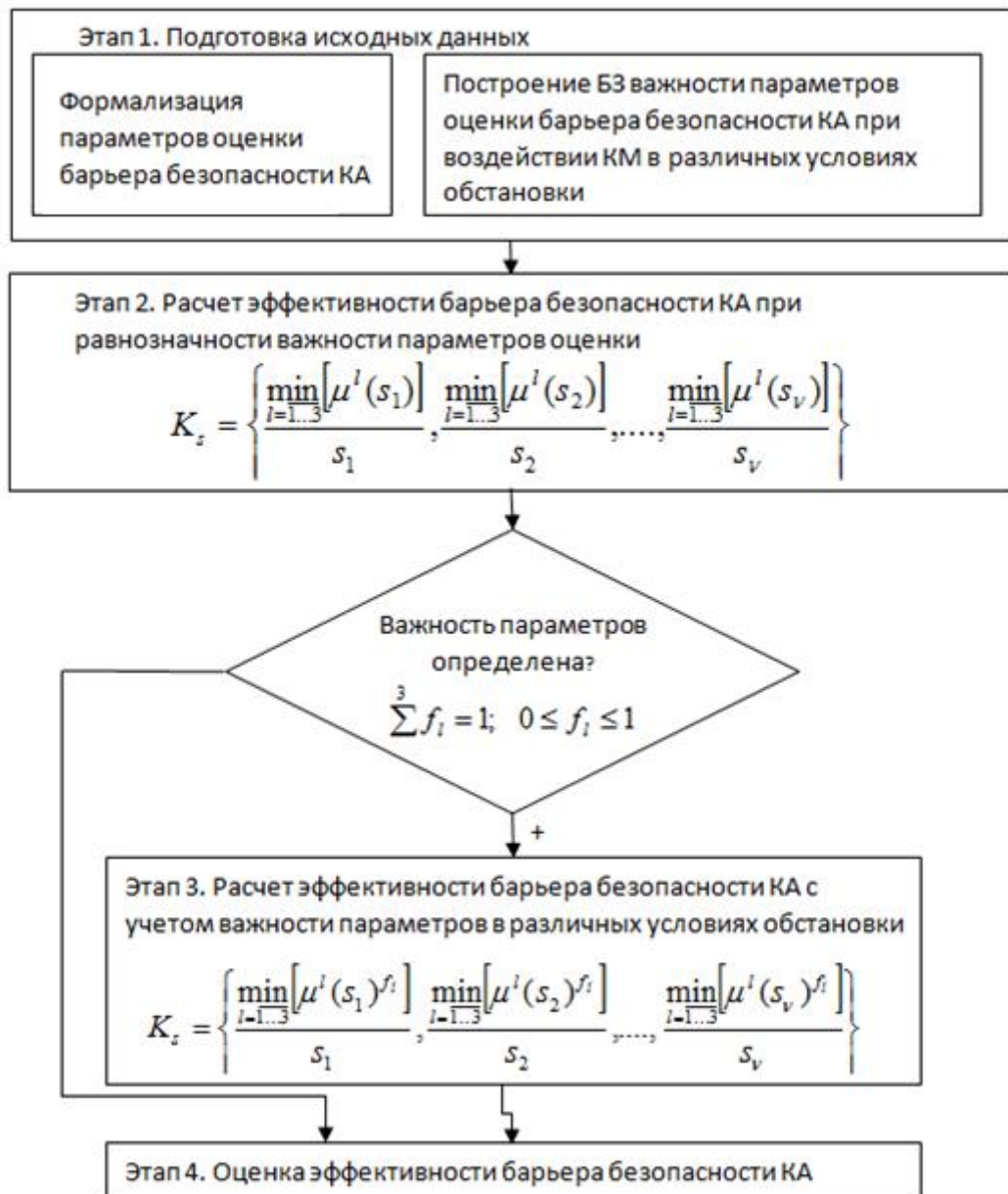


Рис. 2.7 Структура методики оценки эффективности барьера безопасности при воздействии антропогенных частиц

## 2.6. Обоснование структуры и содержание методики построения базы знаний комплексной интеллектуальной информационной системы по защите от антропогенных частиц

На этапе подготовки исходных данных формируется матрица знаний по безопасности КА при воздействии АЧ. Для этого известные данные по испытаниям и результаты моделирования структурируются относительно возможных повреждений, и формируется таблица, которая определяет систему логических высказываний типа ЕСЛИ- ТО, ИНАЧЕ, связывающих

состояние КА и условия угрозы АЧ с одним из возможных критериев повреждения и барьером безопасности. Источниками знаний при решении этой задачи являются:

- экспериментальные исследования высокоскоростных ударов (натурные и модельные эксперименты) и анализ статистической информации, накопленной в ходе проведения подобных испытаний, результаты столкновений КА и АЧ, зафиксированные в космосе.

- инструкции, технические описания и нормативно-справочная документация, определяющая деятельность операторов и порядок эксплуатации КА в условиях возникновения аварийных ситуаций. В указанных выше документах достаточно хорошо описаны задачи поддержания функциональной готовности КА, структурированы ситуации, подлежащие распознаванию, описаны последовательности возникновения и развития этих ситуаций и требуемые от оператора действия. Ситуации, описанные в инструкциях, характеризуются либо установочными значениями параметров, либо динамикой их изменения, выраженной в виде нечетких понятий типа "резко повысилась" или "медленно снижается";

Проведение экспериментов позволяет получить наиболее полное и точное описание функционирования средств, однако их проведение требует больших затрат, а в ряде случаев и небезопасно. Анализ статистической информации полезен при определении зависимостей между параметрами, однако он не дает информации о ситуациях, никогда не происходивших на практике;

- эксперты, в качестве которых привлекались наиболее опытные специалисты имеющие системотехнические знания и интуицию, из числа проводивших испытания. Эксперты являются основным источником знаний о прогнозе воздействия высокоскоростной частицы на материал стенки и КА в целом. Основным видом взаимодействия с экспертом является собеседование, в процессе которого знания формулируются в виде нечетких правил вида "ЕСЛИ-ТО".

С использованием операций  $\cup$  (ИЛИ) и  $\cap$  (И) матрица знаний представляется в виде:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[ w_{jp} \bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right] \rightarrow y = (d_j, s_{j1...jv}), j = \overline{1..m}, s = \overline{1..v}$$

где  $y=(d_j, S_{j1...S_{jv}})$  – прогнозируемое повреждение из множества D и барьер безопасности из множества S;

$a_i^{jp}$  - лингвистическая оценка параметра  $x_i$  в  $p$ -й строке  $j$ -ой дизъюнкции, выбираемая из соответствующего терм множества  $a_i$ ,  $i=1...n$ ,  $j=1...m$ ,  $p=1...k_j$ ;

$w_{jp}$ -число в диапазоне  $[0,1]$ , которое характеризует вес правила с номером  $jp$ ;

$k_j$ - количество правил, определяющих  $d_j$ ,  $j=1,m$ ;

На этапе прогноза повреждения проводится обобщение параметров, определяющих условия и результат возможного воздействия. Для этого строится дерево прогнозирования результатов воздействия АЧ, определяющее систему вложенных друг в друга моделей меньшей размерности.

Для определения прогнозного значения повреждения введен коэффициент истинности критерия повреждения. Коэффициент вычисляется на основе логико-лингвистического подхода. Его физический смысл отражает степень соответствия возможного критерия повреждения текущим условиям.

Решение системы логических уравнений можно записать следующим образом:

$$K_{dj}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max_{p=1, k_j} \left\{ w_{jp} \min_{i=1, n} \left[ \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right] \right\}, j = \overline{1, m}$$

Коэффициент истинности критерия повреждения зависит от весов правил ( $w_{jp}$ ) и значений функции принадлежности параметров, определяющих условия взаимодействия.

Обучение базы знаний прогнозированию результатов взаимодействия является одним из основных этапов разрабатываемой методики. Для построенной матрицы знаний разрабатывается нейро-нечеткая сеть, которая обладает способностью использовать вербальные знания и настраиваться методами машинного обучения.

Интервалы изменения каждого параметра приведены к одному универсальному интервалу  $u=[0,4]$  с помощью соотношений  $u = 4 \frac{x_i - x_i}{x_i - x_i}$

Функции принадлежности, построенные известными экспертными методами, аппроксимируются аналитической формой вида:

$$\mu(u) = \frac{1}{1 + \left( \frac{u - b_i}{c_i} \right)^2}$$

где  $b_i$  и  $c_i$ - параметры настройки для  $i$ -го параметра.

Выбор такой формы обусловлен тем, что она хорошо описывает функции принадлежности, полученные методом статистической обработки экспертных оценок и удобна для проведения настройки.

Суть настройки НН-сети состоит в подборе весов дуг, который минимизирует различия между результатами нейро-нечеткой аппроксимации и известными результатами испытаний. Настройка НН-сети оценивается по величине рассогласования результатов полученных на модели знаний и данными по испытаниям. Этот показатель вычисляется как сумма квадратов разности значений коэффициента истинности критерия повреждения, полученных на модели знаний и для выборки данных по результатам повреждений материалов.

$$Q = \sum_{l=1}^M \left[ \sum_{j=1}^m [\mu^{d_j}(X^l, W, B, C) - \mu^{d_j}(X^l)]^2 \right] = \min_{W, B, C}$$

$$\text{где } \mu^{d_j}(X^l) = \begin{cases} 1, & d_j = d^l \\ 0, & d_j \neq d^l \end{cases}$$



При этом нейрореподобная сеть используется для непосредственного обучения нечетких правил ЕСЛИ, ТО.

Задача настройки НН-сети решается в два этапа с использованием двойственной сети методом градиентного обучения. Это позволило проводить обучение прогнозированию результатов воздействия АЧ по известным примерам, обеспечивая нахождение оптимальных значений весов связей НН-сети на первом этапе, а затем зафиксировав синаптическую карту сети проводить подстройку значений параметров на входе для фиксированного критерия повреждения получая новые наборы входных параметров для продолжения обучения БЗ КИИС.

Для оценки результатов обучения базы знаний, оценивается вероятность безошибочного прогнозирования по каждому критерию и их осредненная вероятность.

Оценка эффективности барьера безопасности сведена к известной в теории принятии решения схеме Беллмана Заде на основе принципа слияния нечетких параметров оценки. Для этого введен этап формализации параметров оценки барьера безопасности по каждому критерию. Значение данного этапа методики состоит в том, чтобы на основе экспертного попарного сравнения барьеров проводится их оценка с использованием нечетких множеств.

Показателем выбран коэффициент пригодности барьера, который вычисляется в системе нечетких логических уравнений на основе логико-лингвистического подхода. Его физическим смыслом является гарантированный результат, определяемый совместной оценкой параметров описывающих барьеров.

Эффективным барьером является тот, который имеет максимальное значение гарантированной оценки по указанным параметрам ( $\max \min$ ).

Для учета в автоматическом режиме условий обстановки проводится ранжирование параметров барьера по важности с использованием нечетких множеств.

В этом случае рациональный барьер определяется с учетом коэффициентов важности параметров, которые вычисляются при угрозе воздействия антропогенных частиц. Важность параметров первоначально определяются как результат решения нечетких логических уравнений, построенных на основе правил учета вещественных, временных и вероятностных характеристик сведенных в базу знаний важности параметров. Для расчета важности параметров используется алгоритм этапа формализации параметров оценки барьера.

После формализации параметров оценки барьера, и их важности, становится возможным применение алгоритма оценки эффективности и выбора барьера. Задача сводится к оценке эффективности барьера с учетом текущих условий обстановки.

Структурная схема методики построения БЗ КИИС обеспечения безопасности КА при воздействии АЧ представлена на рисунке 2.8.

Достоверность разработанной методики определялась точностью учета параметров при оценке эффективности и зависит от важности и способа учета в модели знаний каждого параметра. Повышение достоверности методики определяется возможностью автоматического учета важности параметров в семантическом описании барьера безопасности, что позволяет учесть принципы целесообразности деятельности при подключении барьера безопасности.

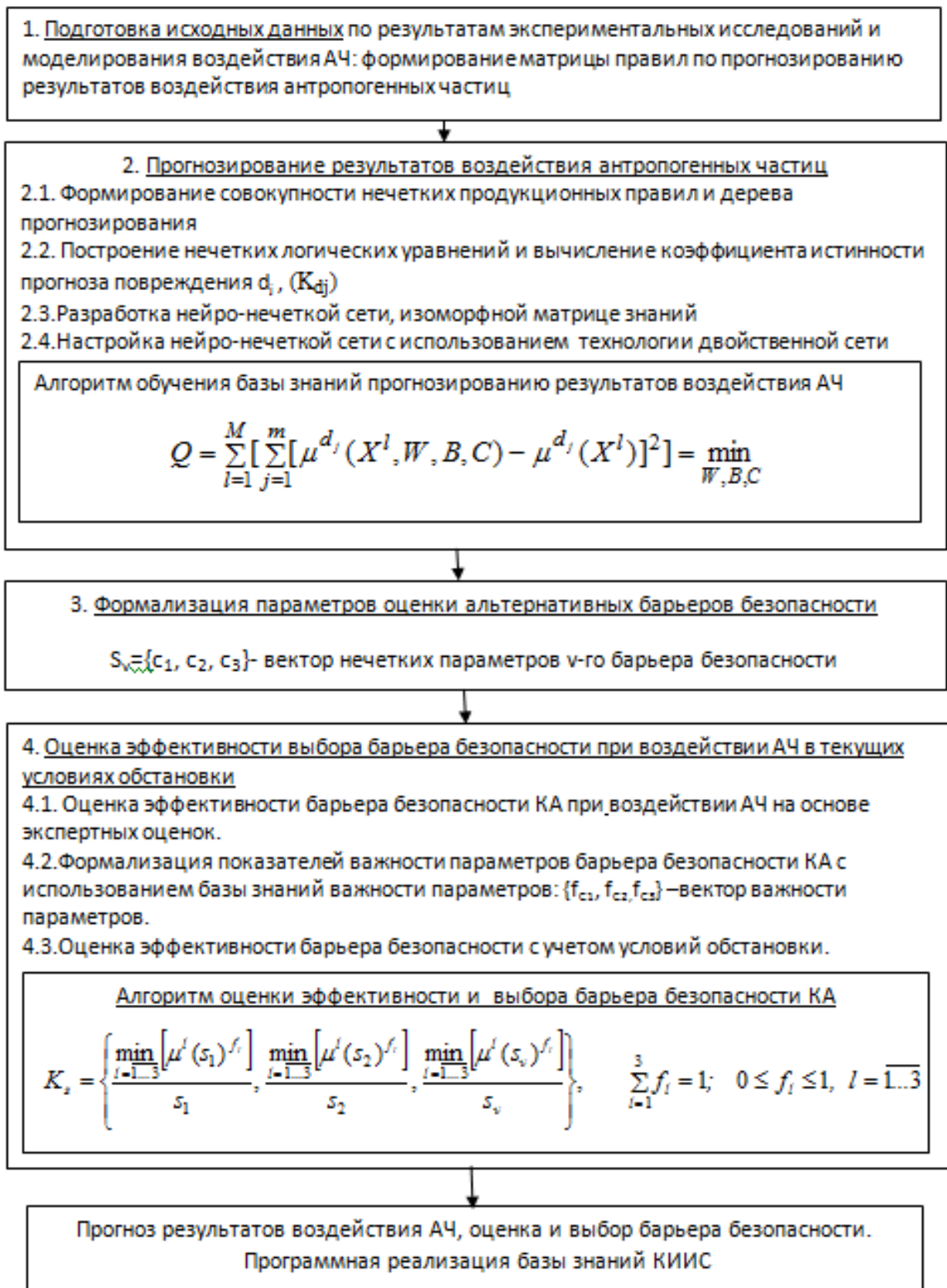


Рис.2.8. Структурная схема методики построения БЗ КИИС защиты от антропогенных частиц

## Выводы по главе

В качестве основы для представления знаний в БЗ КИИС выбрано нечеткое продукционное правило, реализующее выявленные зависимости и высказанные экспертами знания по результатам воздействия антропогенных частиц. Нечеткое правило представляет собой упорядоченную пару  $(A, B)$ , где  $A$  - нечеткое подмножество множества входных параметров, определяемых характеристиками КА и АЧ, а также особенностями их взаимного движения, а  $B$  - нечеткое подмножество множества решений по обеспечению безопасности КА (прогнозирование критерия повреждения и определение соответствующего текущим условиям барьера безопасности) с возможностью объяснения (интерпретации) на естественном языке.

Нечеткие продукционные правила в совокупности образуют базу знаний. Особенностью нечеткой БЗ является то, что в выводе участвуют все правила, но степень влияния каждого из них на конечный результат различный. Принцип суперпозиции различных влияний лежит в основе работы нечетких интеллектуальных систем.

В основе построения БЗ (ее модели знаний) по обеспечению безопасности КА от воздействия объектов АЧ лежат принципы, которые являются обобщением и дальнейшим развитием аналогичных принципов, сформулированных в работе [84, 85].

1) Принцип лингвистичности исходных данных. В соответствии с этим принципом, входные параметры, критерии повреждения и барьеры безопасности КА рассматриваются как лингвистические переменные, которые оцениваются качественными термами (терм - от англ, term - называть).

Согласно Л. Заде [86], лингвистической переменной называется такая переменная, значениями которой являются слова или предложения естественного языка, т.е. качественные термы. Используя понятие функции принадлежности, каждый из термов, оценивающих лингвистическую переменную, можно формализовать в виде нечеткого множества, заданного на соответствующем универсальном множестве.

2) Принцип формирования структуры зависимости "ситуация-подключаемый барьер безопасности" в виде нечеткой базы знаний. Нечеткая база знаний представляет собой совокупность правил ЕСЛИ <параметры>, ТО <решение>, которые отражают опыт эксперта и его понимание причинно-следственных связей в задаче принятия решения по обеспечению безопасности КА при воздействии АЧ.

Особенность высказываний состоит в том, что их адекватность изменяется при незначительных изменениях состояния предметной области. Поэтому формируемую экспертно нечеткую базу знаний можно рассматривать как грубая модель с параметрами, подлежащими настройке. В данном случае настройке подлежат формы функций принадлежности нечетких термов, с помощью которых оцениваются входные и выходные параметры.

Кроме того, совокупность правил ЕСЛИ-ТО можно рассматривать как набор фиксированных точек в пространстве "ситуация - решение ". Применение аппарата нечеткого логического вывода позволяет восстанавливать по этим точкам многомерную поверхность, которая позволяет получать решения при различных комбинациях значений входных параметров.

3) Принцип иерархичности базы знаний.

Использование этого принципа позволяет преодолеть "проклятие размерности". При большом числе входных параметров построение системы высказываний о "условия воздействия-критерий повреждения " становится трудновыполнимым для эксперта. Это обусловлено тем, что в оперативной памяти человека одновременно может удерживаться не более  $7 \pm 2$  понятий-признаков [87]. В связи с этим целесообразно провести классификацию параметров и по ней построить дерево прогнозирования, определяющее систему вложенных друг в друга высказываний-знаний меньшей размерности. Пример такого дерева для 9-ти входных параметров показан на рис. 2.9

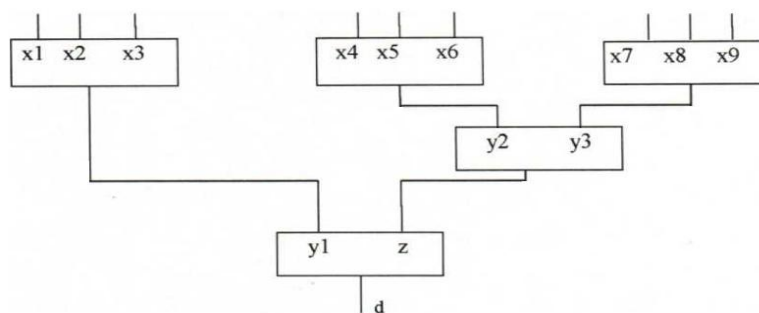


Рис. 2.9 Дерево логического вывода

Знания вида  $d=(x_1, x_2, \dots, x_9)$ , связывающие параметры КА и АЧ  $x_1..x_9$  с возможным повреждением  $d$ , заменяются последовательностью подстановок:

$$d=d(y_1, z)$$

$$y_1=y_1(x_1, x_2, \dots, x_9), z=z(y_2, y_3)$$

$$y_2=y_2(x_4, x_5, x_6), y_3=y_3(x_7, x_8, x_9)$$

где  $y_1, y_2, y_3, z$  - обобщенные параметры, рассматриваемые как лингвистические переменные.

За счет принципа иерархичности можно учитывать практически неограниченное число входных параметров, определяющих результат повреждения КА. При построении дерева прогнозирования необходимо стремиться к тому, чтобы число аргументов (входных стрелок) в каждом узле дерева удовлетворяло правилу  $7 \pm 2$ . Целесообразность по уровневому представлению экспертных знаний обусловлена не только иерархичностью представления исходной задачи, но и возможностью учета новых параметров по мере накопления знаний.

Сформулирован принцип двухэтапного построения модели знаний для прогнозирования результатов воздействия АЧ (рис.2.10).

Первый этап является традиционным для логико-лингвистического подхода. На нем осуществляется построение матрицы знаний по доступной информации, полученной в ходе испытаний с участием экспертов. Для построения функций принадлежности применяются известные методы статистической обработки экспертной информации [88]. Чем выше профессиональный уровень эксперта, тем выше адекватность формируемой модели знаний. Для ее построения используется только экспертная

информация. Однако нельзя гарантировать совпадение результатов нечеткого логического вывода (на модели) и экспериментальных данных. Поэтому необходим второй этап, на котором осуществляется настройка модели знаний путем ее обучения данными полученными в ходе испытаний и моделирования.

Для этого строится специальная нейро-нечеткая сеть, изоморфная матрице знаний.



Рис. 2.10 Этапы построения модели знаний для прогнозирования

Суть этапа состоит в подборе таких весов нечетких правил ЕСЛИ-ТО и параметров функций принадлежности, которые минимизируют различие между объективным (экспериментальным) и модельным (теоретическим) описанием критериев повреждения. Для прогнозирования возможных условий воздействия АЧ проводится второй этап обучения БЗ, в ходе которого настраиваются параметры на входе ННС при фиксированных настроенных весах правил, параметрах функций принадлежности и критерии повреждения. Это позволяет повысить качество обучения БЗ за счет

использования дополнительных примеров и придать КИИС способность «понимать» возникающие состояния имею сформированный набор примеров.

Настройка НН-сети сформулирована как задача нелинейной оптимизации, которая может решаться различными методами. Однако, при большом количестве параметров и нечетких термов в базе знаний требует поиска минимума показателя из разных начальных точек, что существенно увеличивает затраты машинного времени. Поэтому в исследовании предлагается настройка нечеткой базы знаний с применением двойственных сетей методом обратного распространения ошибки [89]. Предлагаемый подход близок к так называемому “нейро -нечеткому” подходу [76], объединяющему способности нейронных сетей к обучению и легкую интерпретируемость нечетких правил “ЕСЛИ, ТО”. Однако нейронная сеть используется для непосредственной настройки нечетких правила составляющих БЗ (“ЕСЛИ, ТО”) по имеющейся экспериментальной выборке.

Формализация лингвистических оценок альтернативных барьеров безопасности проводится методом парных сравнений, который в отличие от известного метода Саати не требует решения характеристического уравнения матрицы парных сравнений при нахождении элементов ее собственного вектора и позволяет строить функции принадлежности важности параметров способа в масштабе времени близком к реальному.

Оценка эффективности способов обеспечения безопасности проводится на основе параметров оценки оперативности, экономичности и результативность барьера. Предложена дифференциальная схема оценки эффективности на основе экспертных оценок параметров, а также определен порядок ее расчета с учетом условий обстановки в автоматическом режиме. Это позволяет рассматривать задачу оценки эффективности барьера безопасности как многопараметрическую задачу при неравнозначных критериях. Использование методики позволяет оценить эффективность с количественной оценкой пригодности барьера безопасности в текущей обстановке.



### **Глава 3. Экспериментальное исследование методики построения базы знаний комплексной интеллектуальной информационной системы защиты от антропогенных частиц**

Глава содержит описание программной оболочки, реализующей модели и алгоритмы, рассмотренные в предыдущих главах, а также результаты их применения к решению прикладных задач.

В предыдущей главе были разработаны модель знаний и методика построения БЗ КИИС защиты от антропогенных частиц (глава 2). Для подтверждения теоретических положений работы проведено экспериментальное исследование, в котором можно выделить два этапа.

На первом этапе была разработана программная реализация методики построения БЗ КИИС.

На втором этапе проведена оценка результатов, полученных с использованием прототипа КИИС защиты от антропогенных частиц.

#### **3.1. Система «БЛИЦ»**

Программная оболочка «БЛИЦ» предназначена для построения модуля интеллектуального прогнозирования (МИП) на базе нечеткой логики. Система позволяет собирать, хранить и использовать зависимости, полученные в ходе экспериментальных рентгенографических исследований и моделирования характеристик защитных свойств перспективных материалов КА, обработанных с привлечением экспертов. Целью является решение в автоматическом режиме прикладных задач прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц и выбора барьеров безопасности с учетом текущих условий обстановки. Оболочка состоит из двух основных частей: программной среды, позволяющей проводить построение базы знаний в выбранной предметной области, и собственно модуля интеллектуального прогнозирования, который является конечным продуктом.

Структурная схема системы «БЛИЦ» изображена на рисунке 3.1. Она содержит 15 программных блоков, 7 из которых составляют среду разработки базы знаний КИИС, а остальные - собственно МИП.

Блок модификации правил и дерева прогнозирования содержит экранные формы, необходимые для модификации БЗ: внесение изменений в структуру дерева прогнозирования, нечеткие правила и функции принадлежности. Это основной блок среды разработки нечеткой базы знаний.

Он выполняет следующие функции:

- а) формирование дерева логического вывода;
- б) задание функций принадлежности лингвистических термов: модифицированным методом Саати, методом статистической обработки экспертной информации, используя библиотеку стандартных моделей;
- в) наполнение баз знаний;
- г) сохранение (извлечение) баз знаний из библиотеки.

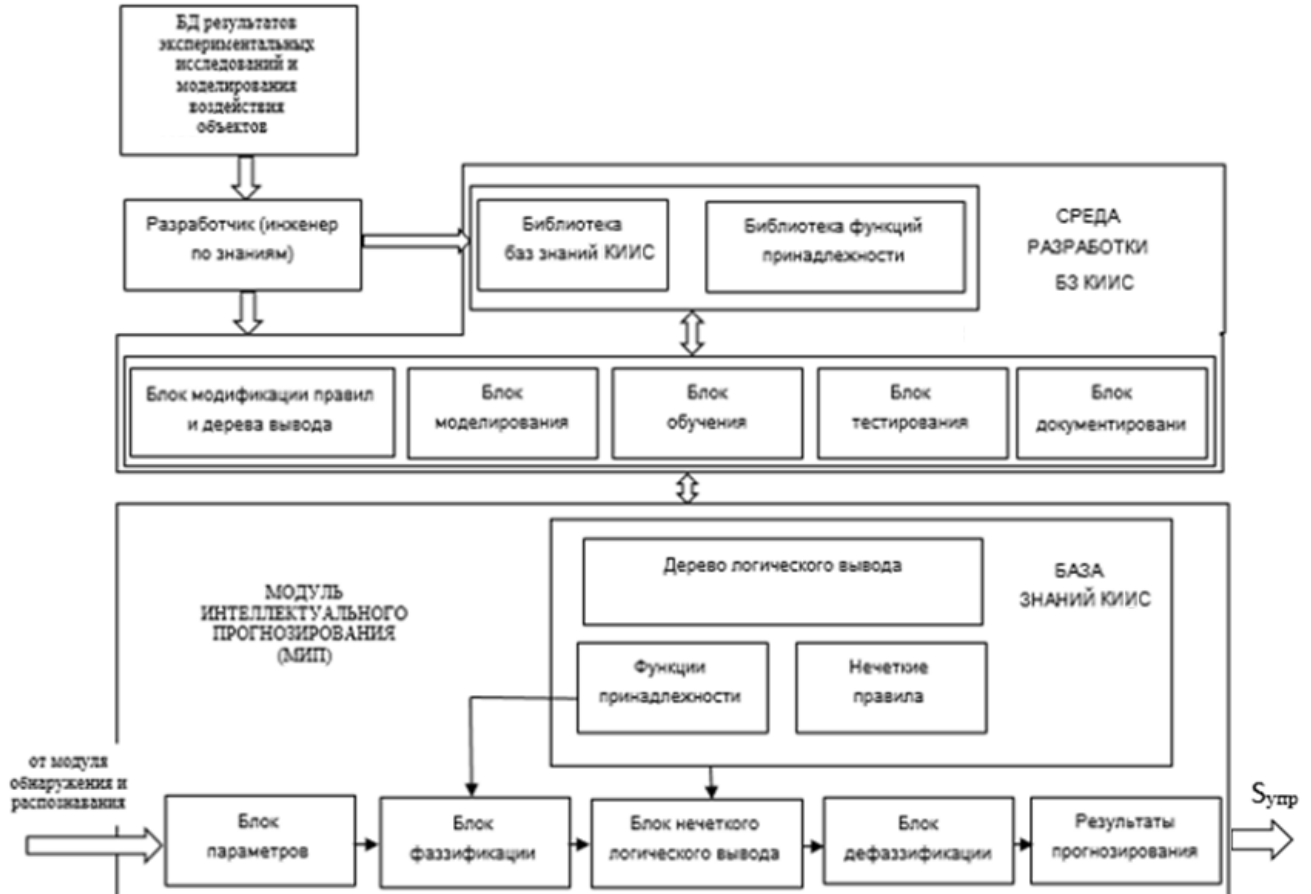


Рисунок 3.1- Структурная схема программного обеспечения «БЛИЦ»

*Блок моделирования* используется для получения графиков и поверхностей, отражающих выходную зависимость от одного или двух контролируемых параметров. Цель моделирования состоит в исследовании объекта в различных областях факторного пространства.

*Блок настройки* предназначен для решения задач обучения модели знаний с целью повышения качества прогноза. Этот блок выполняет следующие функции:

- а) запрос обучающей выборки;
- б) решение задачи настройки модели знания с параметрическими функциями принадлежности с использованием двойственных сетей по технологии генеративных состязательных сетей.

*Блок тестирования* БЗ КИИС предназначен для выполнения следующих действий:

- а) запрос контрольной выборки;
- б) оценка качества результатов прогнозирования повреждений КА в точках тестирующей выборки.

*Блок документирования* осуществляет выдачу информации о построенной БЗ в виде, удобном для разработчика КИИС.

*Библиотека БЗ КИИС* используется для хранения построенных БЗ на различных этапах их разработки (до настройки и после обучения).

*Библиотека функций принадлежности* представлена колоколообразной (с параметрами  $b$  и  $c$ ) моделью функции принадлежности. Имеется возможность расширить набор трапециевидными, треугольными и экспоненциальными формами.

Построение БЗ КИИС выполняется по следующему алгоритму:

А°. Определение характеристик системы.

На этом шаге выводится информация о назначении системы, формируется структура задачи (перечень входных параметров и прогнозируемые критерии повреждения, а также альтернативные барьеры безопасности и перечень параметров их оценки).

Б°. Формирование дерева прогнозирования условий и результатов воздействия АЧ.

Дерево формируется путем последовательного выполнения операций добавления и/или удаления узлов. При добавлении нового узла запрашивается информация о названии (например, Время воздействия АЧ), обозначении ( $t_{км}$ ), количестве термов для оценки и их названия (“малое”, “среднее”, “большое”). При добавлении узла, соответствующего параметрам, запрашивается информация о диапазоне его изменения. Сформированное дерево логического вывода изображено на рис. 3.2.

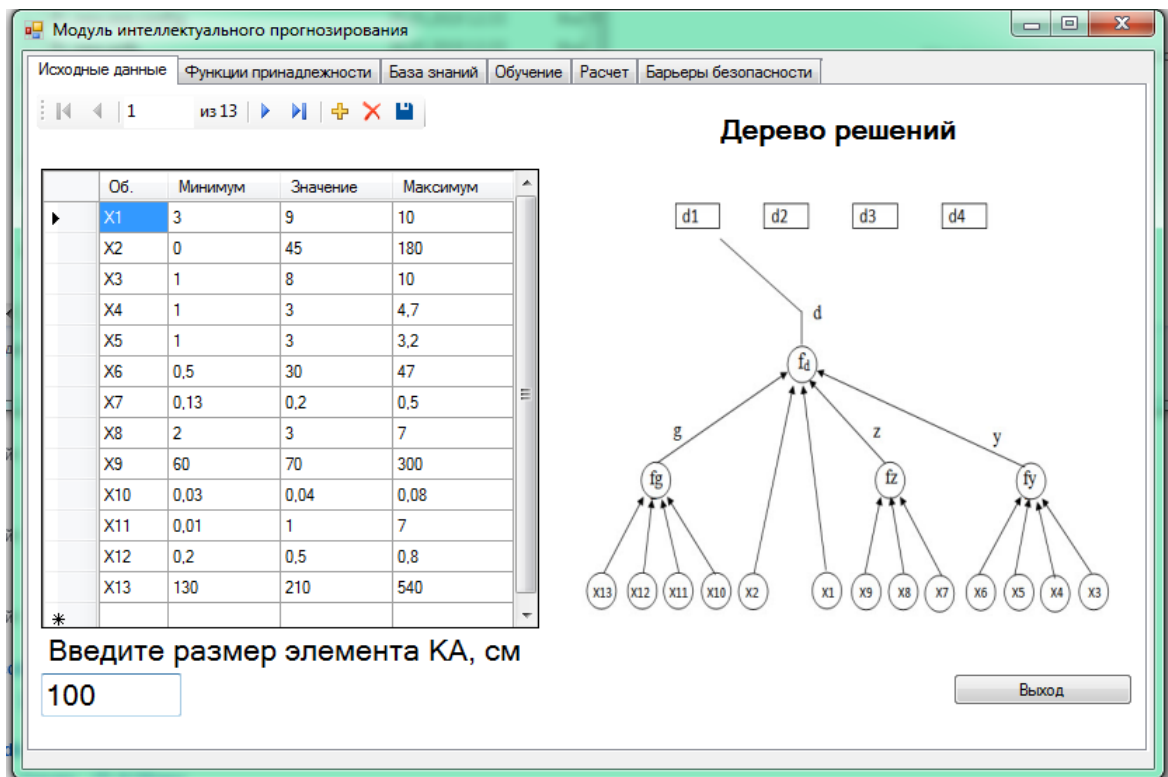


Рисунок 3.2 - Структура «Ввод исходных данных»

В. Определение функций принадлежности лингвистических термов.

На этом шаге определяются модели функций принадлежности, используемые для формализации термов - оценок входных параметров и параметров способов. Этот шаг соответствует этапу фаззификации параметров состояния, параметров способов и их важности (рис.3.3).

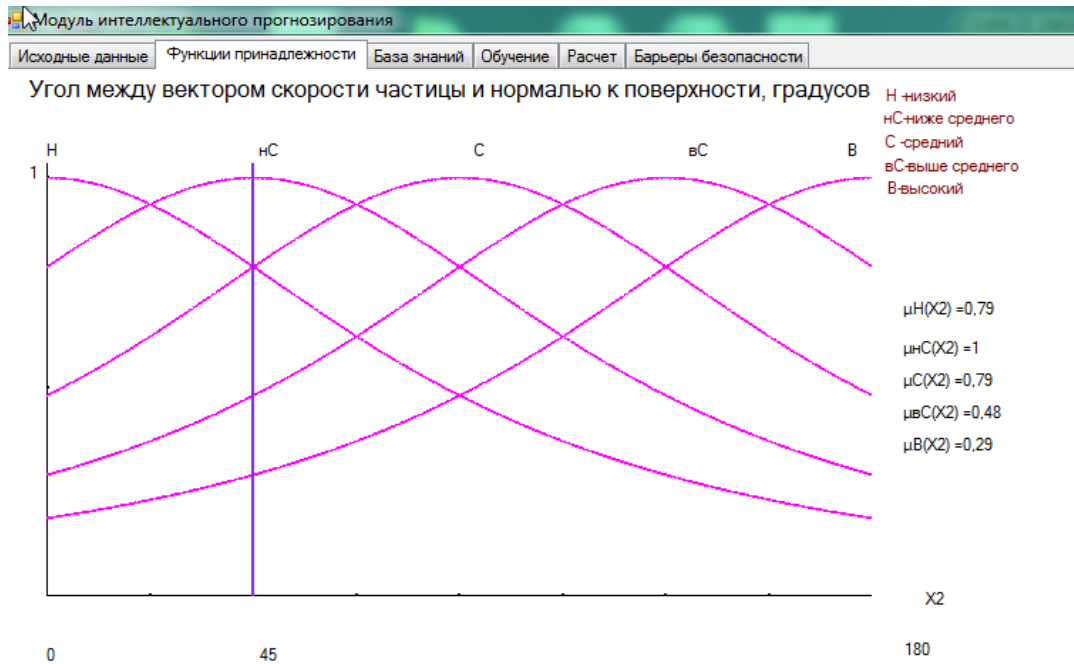


Рисунок 3.3 - Структура «Функции принадлежности»

Г. Формирование эмпирических правил ЕСЛИ-ТО, описывающих возможное состояние КА при воздействии объектов АЧ. Зависимости, полученные в ходе экспериментальных исследований защитных свойств материалов КА, обработанные с привлечением экспертов, с целью решения прикладных задач прогнозирования результатов воздействия АЧ в виде правил ЕСЛИ-ТО вносятся в соответствующие матрицы знаний (рис. 3.4).

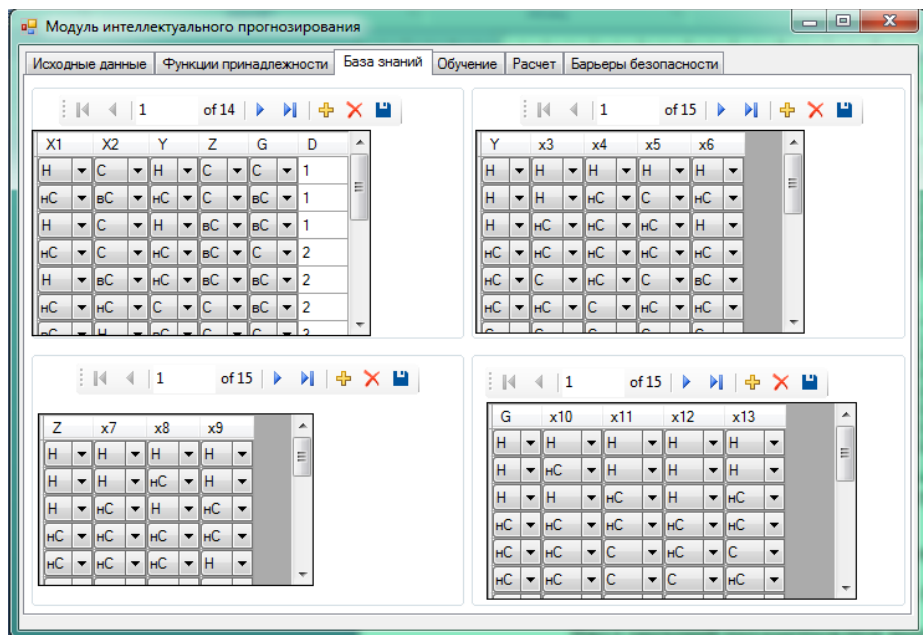


Рисунок 3.4 - Структура «База знаний»

Д°. Расчет прогнозируемого значения критерия повреждения КА, оценка и выбор для реализации барьера безопасности.

Ввод значений параметров при выполнении расчетов осуществляется в цикле работы бортовой вычислительной машины. В результате нечеткого логического вывода рассчитываются значения функций принадлежности для каждого прогнозируемого критерия повреждения КА (рис. 3.5).

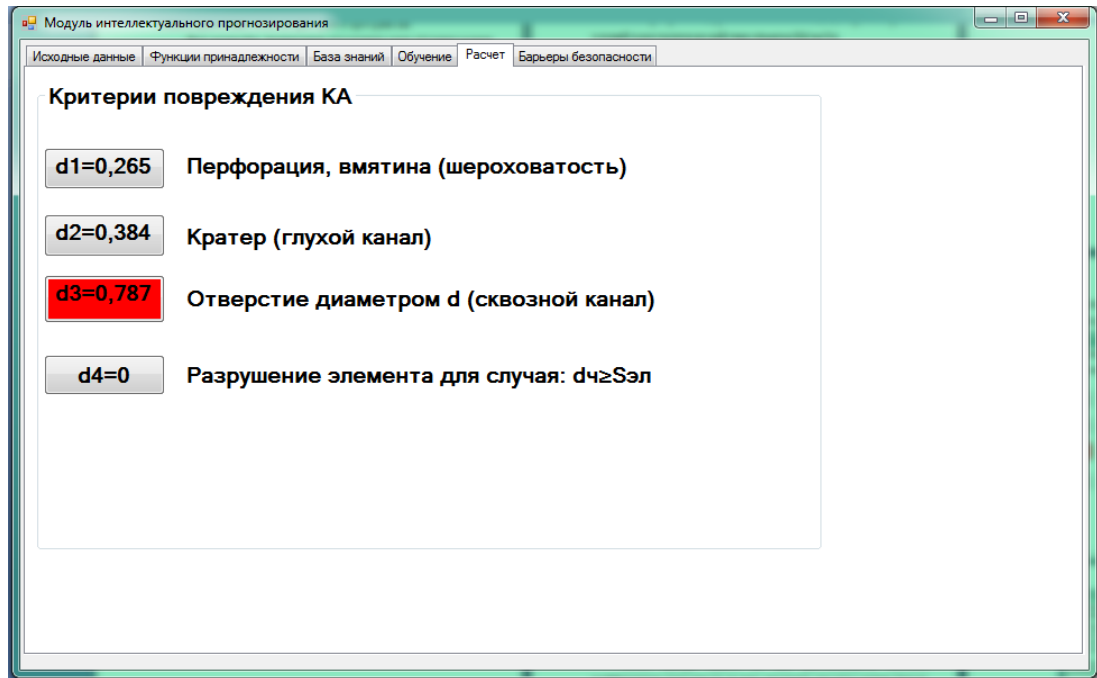
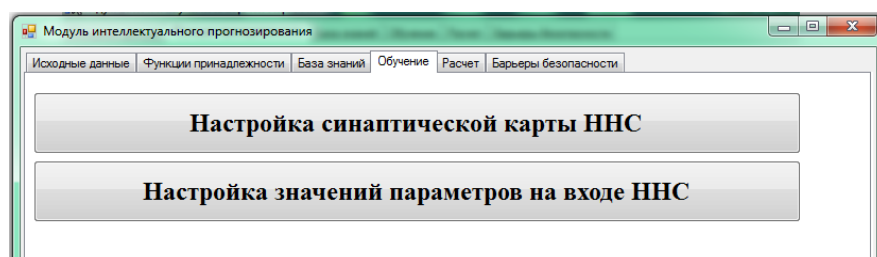


Рисунок 3.5- Структура «Расчет»

После выбора одного из них рассчитываются значения коэффициентов пригодности на всем множестве способов защиты (барьер безопасности), которые корректируются с учетом важности параметров способа защиты.

Ж. Обучение модели знаний путем решения оптимизационной задачи. Она включает - обучение данными по результатам воздействия АЧ для настройки синаптической карты НН-сети и настройку значений входных параметров по заданному критерию повреждения, что позволит повысить достоверность результатов решения задач.



Настройка синаптической карты НН-сети включает:

- настройку весов правил (рис. 3.6);
- настройку параметров функции принадлежности по каждому параметру (рис. 3.7);
- построение графика функции принадлежности после настройки (рис. 3.8).

D	Wfd	Wfdt
1 d1	1.0000	0.934
2 d1	1.0000	0.500
3 d1	1.0000	0.419
4 d2	1.0000	0.500
5 d2	1.0000	0.500
6 d2	1.0000	0.764
7 d3	1.0000	0.428
8 d3	1.0000	0.500
9 d3	1.0000	0.724
10 d4	1.0000	0.663
11 d4	1.0000	0.449
* 12 d4	1.0000	0.449

Y	WY	WYt
1 H	1.0000	0.500
2 H	1.0000	0.500
3 H	1.0000	0.734
4 нС	1.0000	0.500
5 нС	1.0000	0.632
6 нС	1.0000	0.500
7 СМ	1.0000	0.757
8 С	1.0000	0.470
9 С	1.0000	0.473
10 вС	1.0000	0.527
11 вС	1.0000	0.480
12 вС	1.0000	0.664
13 С	1.0000	0.499
14 С	1.0000	0.806
* 15 С	1.0000	0.499

G	WG	WGt
1 H	1.0000	0.500
2 H	1.0000	0.744
3 H	1.0000	0.500
4 нС	1.0000	0.500
5 нС	1.0000	0.500
6 нС	1.0000	0.400
7 СМ	1.0000	0.500
8 С	1.0000	0.500
9 С	1.0000	0.565
10 вС	1.0000	0.771
11 вС	1.0000	0.500
12 вС	1.0000	0.500
13 С	1.0000	0.500
14 С	1.0000	0.500
* 15 С	1.0000	0.500

Z	WZ	WZt
1 H	1.0000	0.500
2 H	1.0000	0.744
3 H	1.0000	0.500
4 нС	1.0000	0.500
5 нС	1.0000	0.500
6 нС	1.0000	0.400
7 СМ	1.0000	0.500
8 С	1.0000	0.500
9 С	1.0000	0.565
10 вС	1.0000	0.771
11 вС	1.0000	0.500
12 вС	1.0000	0.500
13 С	1.0000	0.500
14 С	1.0000	0.500
* 15 С	1.0000	0.500

Экспорт

Рисунок 3.6- Структура «Расчет весов»

	H	нС	С	вС	С
1	3.2580	4.8210	5.3390	7.1070	9.6740
2	-0.0700	37.3400	91.9400	139.4800	180.4900
3	1.0000	3.2500	5.5000	7.7500	10.0000
4	1.0000	1.8800	2.9800	3.7200	4.7000
5	0.9000	1.6700	2.1600	2.7400	3.1900
6	0.6000	11.4800	23.4700	35.4700	46.8000
7	0.1200	0.2370	0.3520	0.4120	0.5300
8	2.1000	3.2800	4.5600	5.7300	7.0900
9	60.0000	114.3000	170.1000	220.4000	300.1800
10	0.0300	0.0480	0.0580	0.0690	0.0790
11	0.0100	1.6700	3.1600	4.9400	6.9600
12	0.2000	0.3600	0.4470	0.6520	0.7700
* 13	139.8700	236.3000	335.2000	432.7000	539.3300

	H	нС	С	вС	С
1	2.3300	5.8000	6.9200	14.0100	18.6200
2	7.8800	40.2000	28.9000	51.9000	86.0800
3	0.7610	0.9850	0.3860	1.4210	0.0640
4	8.0800	11.0800	13.3700	15.2000	18.0800
5	0.8200	1.5000	7.9200	8.8800	10.1400
6	1.0700	16.0700	24.0400	10.8700	6.0700
7	0.0550	0.0260	0.1790	0.0790	0.0660
8	4.0400	4.0400	11.3100	4.0400	13.1900
9	3.1500	7.8000	17.9000	25.9600	31.2000
10	1.0800	1.0800	3.3700	1.2000	1.0800
11	0.6200	3.5000	7.9200	8.8800	10.1400
12	57.3100	0.9850	0.3860	1.4210	0.6400
* 13	0.0000	87.8400	80.3900	109.6000	162.7000

Рисунок 3.7- Структура «Параметры функции принадлежности»

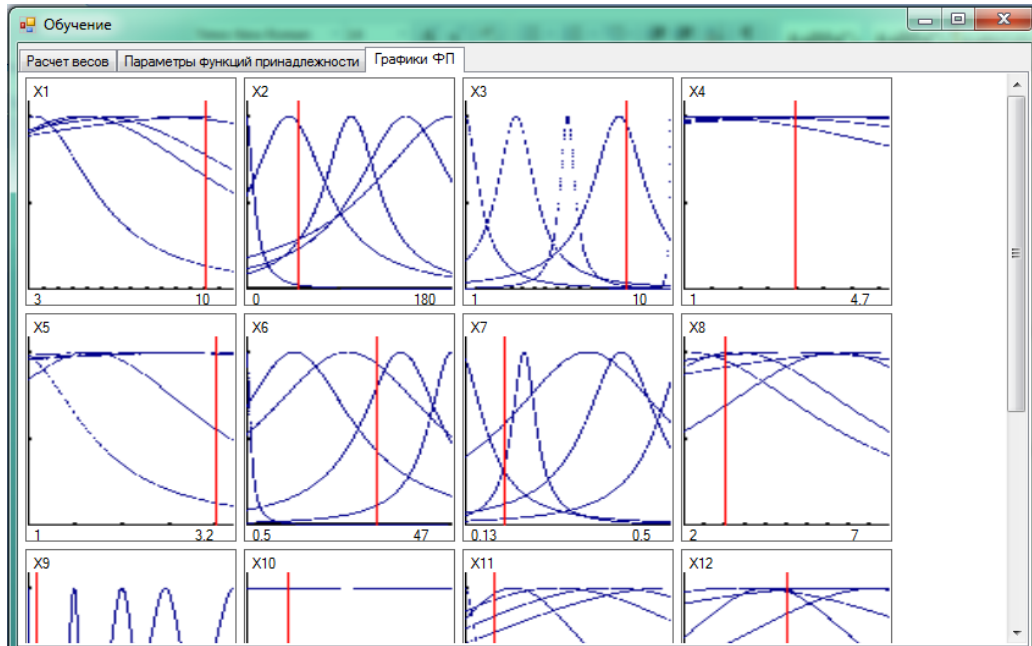


Рисунок 3.8- Структура «Графики функции принадлежности»

Настройка значений входных параметров по заданному критерию повреждения включает генерацию наборов входных параметров НН-сети для заданного критерия повреждения (рис. 3.9.)

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	d
1 генерация	3,00	0,00	1,00	4,70	7,60	21,00	2,70	2,90	60,00	0,60	0,15	0,20	180	d3
2 генерация	2,70	11,00	1,00	4,70	7,80	18,00	1,90	2,90	68,00	0,40	1,00	0,24	200	d3
3 генерация	3,10	16,00	1,00	4,70	7,80	16,00	2,10	2,70	61,00	0,20	0,60	0,30	205	d3
4 генерация	2,40	3,00	2,00	4,70	7,60	14,00	1,10	2,70	72,00	1,70	0,30	0,21	220	d3
5 генерация	2,30	0,00	3,00	4,70	7,80	16,00	0,70	4,30	64,00	1,30	0,10	0,27	130	d3
6 генерация	2,70	8,00	3,00	4,70	7,80	18,00	0,45	4,10	66,00	1,60	3,00	0,26	203	d3
7 генерация	2,00	28,00	5,00	4,70	7,60	15,00	0,39	4,40	200,00	2,00	3,20	0,35	250	d2
8 генерация	2,50	20,00	3,00	4,70	7,80	11,00	0,15	4,90	187,00	1,80	4,50	0,40	210	d2
9 генерация	1,40	45,00	1,00	4,70	7,80	4,00	0,13	7,00	280,00	2,20	7,00	0,70	401	d1
10 генерация	1,10	41,00	1,00	4,70	7,60	3,00	0,17	6,90	269,00	2,20	6,00	0,80	380	d1
11 генерация	3,50	0,00	5,00	4,70	7,80	21,00	0,35	1,20	60,00	0,06	0,03	0,20	130	d4
12 генерация	3,30	0,00	7,00	4,70	7,80	18,00	0,47	1,40	60,00	0,07	0,04	0,21	130	d4
*														

Рисунок 3.9- Структура «Значения параметров на входе НН-сети»

3. Оценка эффективности барьеров безопасности проводится в реальном времени возможного столкновения по каждому из реализованных на борту способу защиты. Результат расчета включает автоматическую оценку эффективности без учета важности параметров барьера безопасности и с их учетом. Что позволяет сформировать команду управление на



подключение барьера с наибольшим значением эффективности по защите (рис. 3.10).

Модуль интеллектуального прогнозирования

Исходные данные | Функции принадлежности | База знаний | Обучение | Расчет | Барьеры безопасности

**Эффективность барьера безопасности**

Барьер	Содержание
S1	Выполнение маневра по уклонению (аварийной программы по подъему перигея на 20 км)
S2	Развертывание в направлении налетающего КМ защитного экрана
S3	Переход КА в дежурный режим

**Без учета важности**

$$K_s = \{0,125/S1, 0,16/S2, 0,08/S3\}$$

**С учетом важности**

$$K_s = \{0,24/S1, 0,37/S2, 0,6/S3\}$$

Рисунок 3.10- Структура «Барьеры безопасности»

### 3.2 Анализ применимости алгоритма обучения базы знаний прогнозированию условий и результатов воздействия антропогенных частиц

Прогнозирование условий и результатов воздействия АЧ является основой для принимаемых на борту мер по защите КА. Каждый обнаруженный и представляющий опасность по критерию опасного сближения и вероятности столкновения объект из окружения КА должен быть оценен на возможность пробоя стенки или разрушения элемента (всего КА). Такая задача является сложной из-за большого количества действующих факторов, имеющих неопределенную природу. Решение по однозначному прогнозу возможного критерия повреждения не является очевидным т.к. его можно описать только сложными сочетаниями параметров состояния и взаимного движения двух тел. Поэтому в качестве исходной информации для формирования гипотез по результатам воздействия АЧ можно использовать только ограниченный набор экспериментальных данных и результатов моделирования, а также косвенные

представления экспертов - описание ситуаций, в которых наступает то или иное событие. Задача обучения модели знаний относится к классу обобщения и классификации текущих состояний. Обобщение текущих состояний заключается в формировании их понятий - выработка обобщенной информации, позволяющей по значениям параметров определять предполагаемый результат повреждения КА [90]. Отличием от задач обучения распознавания образов является то, что в процессе формирования понятий определяются прагматически важные, а не информативные признаки.

Проведение экспериментов (Приложение 1, 2) и моделирование позволили сформировать множество прагматически важных параметров условий взаимодействия космических объектов (АЧ и КА) и возможные диапазоны их изменения.

Таблица 3.1- Параметры условий взаимодействия космических объектов (АЧ и КА) и возможные диапазоны их изменения

Наименование параметра	Обозначение	Диапазон значений параметра и его размерность
Параметры высокоскоростного соударения		
Скорость взаимодействия АЧ и КА в точке встречи $V_n$	X1	3...10 км·с <sup>-1</sup>
Угол между вектором скорости частицы и нормалью к поверхности $\theta$	X2	0...90°
Параметры АЧ		
Диаметр частицы $dч$	X3	1...10 см
Скорость частицы $vч$	X4	1...4,7 км·с <sup>-1</sup>
Плотность материала частицы $\rhoч$	X5	1-3,2 г/см <sup>3</sup>
Масса частицы $mч$	X6	0,5...47г
Параметры стенки КА		
Толщина стенки $lст$	X7	0,13-2,2 см
Плотность материала стенки $\rhoст$	X8	2-7 г/см <sup>3</sup>
Твердость материала стенки по Бринеллю НБ	X9	60-300 МПа
Параметры бампера		
Толщина бампера $lб$	X10	0,03-2,2 см
Плотность материала бампера $\rhoб$	X11	0,01-7 г/см <sup>3</sup>
Расстояние между бампером и задней	X12	0,2...0,8 см

Наименование параметра	Обозначение	Диапазон значений параметра и его размерность
стенкой S		
Напряжение текучести материала задней стенки $\sigma_{ст}$	X13	130-850 МПа (Н/мм <sup>2</sup> )

Текущие значения параметров оцениваются в цифровом вычислительном комплексе (ЦВК) КА с использованием информации, полученной от бортовых опико-электронных датчиков и данных, хранящихся в памяти БЦВМ. Задача состоит в том, чтобы для каждого вектора параметров поставить в соответствие упорядоченную совокупность критериев повреждения КА:

- d1- перфорация, вмятина (шероховатость),
- d2-кратер (глухой канал),
- d3-отверстие диаметром d (сквозной канал),
- d4-разрушение элемента для случая:  $d3 \wedge (d4 \geq Sэ)$ .

Параметры  $x1 \dots x13$  представлены как лингвистические переменные. Кроме того, введены следующие лингвистические переменные (рис.3.7):

- выходная переменная d - критерий повреждения стенки КА, который принимает значения d1-d4;
- промежуточные выходные переменные:
- y– пробивная способность АЧ, которая зависит от параметров  $\{x3, x4, x5, x6\}$ ;
- z – устойчивость материала стенки, которая зависит от параметров  $\{x7, x8, x9\}$ ;
- g –устойчивость бампера, которая зависит от параметров  $(x10, x11, x12, x13)$ .

Структура модели представлена на рис. 3.11. в виде дерева прогнозирования, отвечающего соотношениям:

$$d = f_d(x1, x2, y, z, g) \quad (3.1)$$

$$y = f_y(x3, x4, x5, x6) \quad (3.2)$$

$$z = f_z(x7, x8, x9) \quad (3.3)$$

$$g = fg(x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}) \quad (3.4)$$

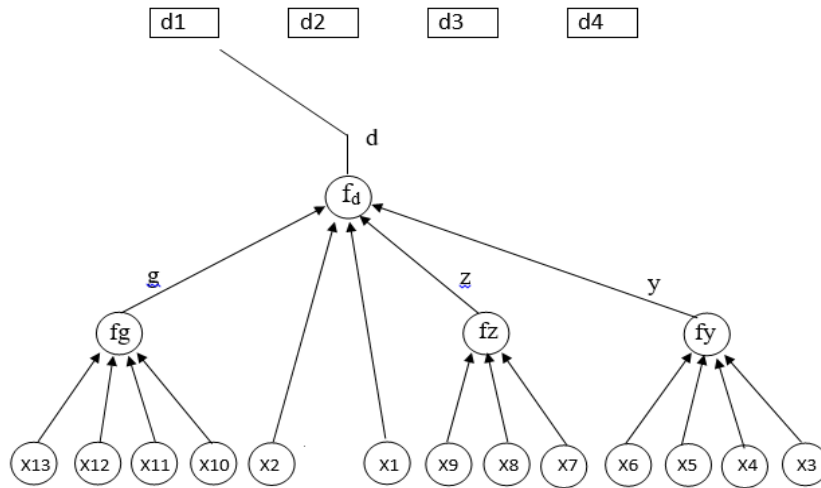


Рисунок 3.11. Структура дерева прогнозирования

Для оценки значений лингвистических переменных  $x_1$ - $x_{13}$ , а также  $y, z, g$  будем использовать единую шкалу качественных термов: Н - низкий, нС - ниже среднего, С - средний, вС - выше среднего, В - высокий. Каждый из этих термов представляет нечеткое множество, заданное с помощью соответствующей функции принадлежности.

Пользуясь введенными термами, и выявленными зависимостями в ходе проведения экспериментальных испытаний (Приложение 2), с привлечением группы экспертов (рук. Федосов Ю.А.), соотношения 3.1-3.4 представлены в виде табл. 3.1- 3.4.

Таблица 3.1. - Знания о соотношении (3.1)

$x_1$	$x_2$	$y$	$z$	$g$	$d$
Н	В	Н	В	В	d1
нС	вС	нС	В	вС	
Н	С	Н	вС	вС	
нС	С	нС	вС	С	d2
Н	вС	нС	вС	вС	
нС	нС	С	С	вС	
вС	Н	вС	С	С	d3
С	нС	С	С	С	
В	Н	вС	нС	нС	
вС	нС	С	нС	Н	d4
вС	Н	вС	Н	нС	
вС	нС	В	Н	Н	
С	Н	вС	Н	нС	

x1	x2	y	z	g	d
B	H	B	H	H	

Таблица 3.2 -Знания о соотношении (3.2)

x3	x4	x5	x6	y
H	H	H	H	H
H	hC	C	hC	
hC	hC	hC	H	
hC	hC	hC	hC	hC
C	hC	C	вC	
hC	C	hC	hC	
C	C	C	C	C
C	вC	C	C	
вC	C	вC	C	
вC	вC	вC	вC	вC
вC	вC	вC	C	
вC	C	вC	вC	
B	B	B	B	B
B	C	вC	B	
B	вC	B	B	

Таблица 3.3 -Знания о соотношении (3.3)

x7	x8	x9	z
H	H	H	H
H	hC	H	
hC	H	hC	
hC	hC	hC	hC
hC	hC	H	
H	hC	hC	
C	C	C	C
C	hC	C	
вC	C	C	
вC	вC	вC	вC
C	вC	вC	
вC	C	вC	
B	B	B	B
B	вC	B	
вC	B	вC	

Таблица 3.4 - Знания о соотношении (3.4)

x10	x11	X12	X13	g
H	H	H	H	H
hC	H	H	H	
H	hC	H	hC	
hC	hC	hC	hC	hC

x10	x11	X12	X13	g
нС	С	нС	С	С
нС	С	С	нС	
С	С	С	С	
С	нС	вС	С	
вС	С	С	вС	
вС	вС	вС	вС	вС
С	В	вС	вС	
вС	С	вС	В	
В	В	В	В	В
В	вС	вС	В	
вС	В	В	вС	

Система нечетких логических уравнений, составленная для табл. 3.1-

3.4 имеет вид:

$$\begin{aligned}
\mu^{d_1}(d) &= [\mu^H(x1) \cdot \mu^B(x2) \cdot \mu^H(y) \cdot \mu^C(z) \cdot \mu^{6C}(g)] \vee \\
&\vee [\mu^{nC}(x1) \cdot \mu^{6C}(x2) \cdot \mu^{nC}(y) \cdot \mu^{6C}(z) \cdot \mu^{6C}(g)] \vee \\
&\vee [\mu^H(x1) \cdot \mu^C(x2) \cdot \mu^H(y) \cdot \mu^B(z) \cdot \mu^C(g)] \\
\mu^{d_2}(d) &= [\mu^{nC}(x1) \cdot \mu^C(x2) \cdot \mu^{nC}(y) \cdot \mu^{nC}(z) \cdot \mu^C(g)] \vee \\
&\vee [\mu^H(x1) \cdot \mu^{6C}(x2) \cdot \mu^{nC}(y) \cdot \mu^C(z) \cdot \mu^{nC}(g)] \vee \\
&\vee [\mu^{nC}(x1) \cdot \mu^{nC}(x2) \cdot \mu^C(y) \cdot \mu^{nC}(z) \cdot \mu^{nC}(g)] \\
\mu^{d_3}(d) &= [\mu^{6C}(x1) \cdot \mu^H(x2) \cdot \mu^{6C}(y) \cdot \mu^{nC}(z) \cdot \mu^H(g)] \vee \\
&\vee [\mu^C(x1) \cdot \mu^{nC}(x2) \cdot \mu^C(y) \cdot \mu^H(z) \cdot \mu^{nC}(g)] \vee \\
&\vee [\mu^B(x1) \cdot \mu^H(x2) \cdot \mu^{6C}(y) \cdot \mu^H(z) \cdot \mu^C(g)] \vee \\
&\vee [\mu^{6C}(x1) \cdot \mu^{nC}(x2) \cdot \mu^C(y) \cdot \mu^{nC}(z) \cdot \mu^{nC}(g)] \\
\mu^{d_4}(d) &= [\mu^{6C}(x1) \cdot \mu^H(x2) \cdot \mu^{6C}(y) \cdot \mu^H(z) \cdot \mu^{nC}(g)] \vee \\
&\vee [\mu^{6C}(x1) \cdot \mu^{nC}(x2) \cdot \mu^B(y) \cdot \mu^{nC}(z) \cdot \mu^H(g)] \vee \\
&\vee [\mu^C(x1) \cdot \mu^H(x2) \cdot \mu^{6C}(y) \cdot \mu^H(z) \cdot \mu^{nC}(g)] \vee \\
&\vee [\mu^B(x1) \cdot \mu^H(x2) \cdot \mu^B(y) \cdot \mu^{nC}(z) \cdot \mu^H(g)]
\end{aligned}
\tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
\mu^H(g) &= [\mu^H(x10) \cdot \mu^H(x11) \cdot \mu^H(x12) \cdot \mu^H(x13)] \vee \\
&\vee [\mu^{nC}(x10) \cdot \mu^H(x11) \cdot \mu^H(x12) \cdot \mu^H(x13)] \vee \\
&\vee [\mu^H(x10) \cdot \mu^{nC}(x11) \cdot \mu^H(x12) \cdot \mu^{nC}(x13)] \\
\mu^{nC}(g) &= [\mu^{nC}(x10) \cdot \mu^{nC}(x11) \cdot \mu^{nC}(x12) \cdot \mu^{nC}(x13)] \vee \\
&\vee [\mu^{nC}(x10) \cdot \mu^C(x11) \cdot \mu^{nC}(x12) \cdot \mu^C(x13)] \vee \\
&\vee [\mu^{nC}(x10) \cdot \mu^C(x11) \cdot \mu^C(x12) \cdot \mu^{nC}(x13)] \\
\mu^C(g) &= [\mu^C(x10) \cdot \mu^C(x11) \cdot \mu^C(x12) \cdot \mu^C(x13)] \vee \\
&\vee [\mu^C(x10) \cdot \mu^{nC}(x11) \cdot \mu^{6C}(x12) \cdot \mu^C(x13)] \vee \\
&\vee [\mu^{6C}(x10) \cdot \mu^C(x11) \cdot \mu^C(x12) \cdot \mu^{6C}(x13)] \\
\mu^{6C}(g) &= [\mu^{6C}(x10) \cdot \mu^{6C}(x11) \cdot \mu^{6C}(x12) \cdot \mu^{6C}(x13)] \vee \\
&\vee [\mu^C(x10) \cdot \mu^B(x11) \cdot \mu^{6C}(x12) \cdot \mu^{6C}(x13)] \vee \\
&\vee [\mu^{6C}(x10) \cdot \mu^C(x11) \cdot \mu^{6C}(x12) \cdot \mu^B(x13)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^B(g) &= [\mu^B(x10) \cdot \mu^B(x11) \cdot \mu^B(x12) \cdot \mu^B(x13)] \vee \\
&\vee [\mu^B(x10) \cdot \mu^{6C}(x11) \cdot \mu^{6C}(x12) \cdot \mu^B(x13)] \vee \\
&\vee [\mu^{6C}(x10) \cdot \mu^B(x11) \cdot \mu^B(x12) \cdot \mu^{6C}(x13)]
\end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
\mu^H(z) &= [\mu^H(x7) \cdot \mu^H(x8) \cdot \mu^H(x9)] \vee [\mu^H(x7) \cdot \mu^{nC}(x8) \cdot \mu^H(x9)] \\
&\vee [\mu^{nC}(x7) \cdot \mu^H(x8) \cdot \mu^{nC}(x9)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{nC}(z) &= [\mu^{nC}(x7) \cdot \mu^{nC}(x8) \cdot \mu^{nC}(x9)] \vee [\mu^{nC}(x7) \cdot \mu^{nC}(x8) \cdot \mu^H(x9)] \\
&\vee [\mu^H(x7) \cdot \mu^{nC}(x8) \cdot \mu^{nC}(x9)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^C(z) &= [\mu^C(x7) \cdot \mu^C(x8) \cdot \mu^C(x9)] \vee [\mu^C(x7) \cdot \mu^{nC}(x8) \cdot \mu^C(x9)] \\
&\vee [\mu^{6C}(x7) \cdot \mu^C(x8) \cdot \mu^C(x9)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{6C}(z) &= [\mu^{6C}(x7) \cdot \mu^{6C}(x8) \cdot \mu^{6C}(x9)] \vee [\mu^C(x7) \cdot \mu^{6C}(x8) \cdot \mu^{6C}(x9)] \\
&\vee [\mu^{6C}(x7) \cdot \mu^C(x8) \cdot \mu^{6C}(x9)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^B(z) &= [\mu^B(x7) \cdot \mu^B(x8) \cdot \mu^B(x9)] \vee [\mu^B(x7) \cdot \mu^{6C}(x8) \cdot \mu^B(x9)] \\
&\vee [\mu^{6C}(x7) \cdot \mu^B(x8) \cdot \mu^{6C}(x9)]
\end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned}
\mu^H(y) &= [\mu^H(x3) \cdot \mu^H(x4) \cdot \mu^H(x5) \cdot \mu^H(x6)] \vee [\mu^H(x3) \cdot \mu^{nC}(x4) \cdot \mu^C(x5) \cdot \mu^{nC}(x6)] \\
&\vee [\mu^{nC}(x3) \cdot \mu^{nC}(x4) \cdot \mu^{nC}(x5) \cdot \mu^H(x6)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{nC}(y) &= [\mu^{nC}(x3) \cdot \mu^{nC}(x4) \cdot \mu^{nC}(x5) \cdot \mu^{nC}(x6)] \vee [\mu^C(x3) \cdot \mu^{nC}(x4) \cdot \mu^C(x5) \cdot \mu^{6C}(x6)] \\
&\vee [\mu^{nC}(x3) \cdot \mu^C(x4) \cdot \mu^{nC}(x5) \cdot \mu^{nC}(x6)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^C(y) &= [\mu^C(x3) \cdot \mu^C(x4) \cdot \mu^C(x5) \cdot \mu^C(x6)] \vee [\mu^C(x3) \cdot \mu^{6C}(x4) \cdot \mu^C(x5) \cdot \mu^C(x6)] \\
&\vee [\mu^{6C}(x3) \cdot \mu^C(x4) \cdot \mu^{6C}(x5) \cdot \mu^C(x6)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^{6C}(y) &= [\mu^{6C}(x3) \cdot \mu^{6C}(x4) \cdot \mu^{6C}(x5) \cdot \mu^{6C}(x6)] \vee [\mu^{6C}(x3) \cdot \mu^{6C}(x4) \cdot \mu^{6C}(x5) \cdot \mu^C(x6)] \\ &\vee [\mu^{6C}(x3) \cdot \mu^C(x4) \cdot \mu^{6C}(x5) \cdot \mu^{6C}(x6)] \\ \mu^B(y) &= [\mu^B(x3) \cdot \mu^B(x4) \cdot \mu^B(x5) \cdot \mu^B(x6)] \vee [\mu^B(x3) \cdot \mu^C(x4) \cdot \mu^{6C}(x5) \cdot \mu^B(x6)] \\ &\vee [\mu^B(x3) \cdot \mu^{6C}(x4) \cdot \mu^B(x5) \cdot \mu^B(x6)] \end{aligned} \quad (3.8)$$

Общее число нечетких логических уравнений составляет 19. При формировании правил их исходные веса принимаются равными единице.

В общем случае каждый параметр  $x_1 \dots x_{13}$  имеет свои собственные функции принадлежности нечетким термам (Н, нС, С, вС, В), которые используются в уравнениях (3.5)-(3.8). Для упрощения моделирования использована только одна форма функций принадлежности, которая показана на рис.3.12.

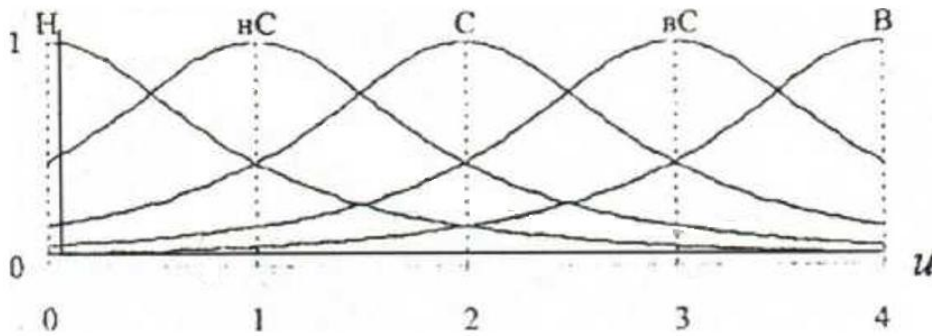


Рисунок 3.12 - Вид функции принадлежности

Для этого интервалы изменения каждого параметра приведены к одному универсальному интервалу  $u=[0, 4]$  с помощью следующих соотношений:

$$\mu^j(x_i) = \mu^j(u), \quad u = 4 \frac{x_i - \underline{x}_i}{\overline{x}_i - \underline{x}_i}, \quad j = \{Н, нС, С, вС, В\}$$

где  $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$  - интервал изменения параметра  $x_i = 1 \dots 13$ . Аналитическая модель функций принадлежности (3.9):

$$\mu^j(u) = \frac{1}{1 + \left( \frac{u - b_j}{c_j} \right)^2} \quad (3.9),$$

а ее параметры  $b$  и  $c$  приведены в табл.3.5. Выбор таких функций обусловлен тем, что они являются хорошими аппроксимациями функций принад-



лежности, полученных методом статистической обработки экспертной информации.

Таблица 3.5 - Параметры функций принадлежности (3.9)

Терм	Н	нС	С	вС	В
b	0	1	2	3	4
c	1,923	1,923	1,923	1,923	1,923

Нечеткие логические уравнения (3.5)-(3.8) вместе с функциями принадлежности нечетких термов (3.9) позволяют прогнозировать результат воздействия АЧ по следующему алгоритму:

1°. Зафиксируем значения параметров состояния  $X^* = (x1^*, x2^*, \dots, x13^*)$

2°. Используя модель (5.9) и параметры b и c из табл. 5.5, определим значения функций принадлежности  $\mu^j(x_i^*)$ , при фиксированных значениях параметров  $x_i^*$ ,  $i=1...13$ .

3°. Используя логические уравнения (3.5)-(3.8), вычислим значения функций принадлежности  $\mu^{dj}(x1^*, x2^*, \dots, x13^*)$  для всех критериев повреждений  $d_1, \dots, d_4$ . При этом, логические операции И( $\wedge$ ) и ИЛИ( $\vee$ ) над функциями принадлежности заменяются операциями min и шах:

$$\mu(a) \wedge \mu(b) = \min[\mu(a), \mu(b)],$$

$$\mu(a) \vee \mu(b) = \max[\mu(a), \mu(b)],$$

4°. Определим критерий  $d_j^*$ , для которой:

$$\mu^{d_j^*}(x1^*, x2^*, \dots, x13^*) = \max[\mu^{dj}(x1^*, x2^*, \dots, x13^*)]$$

Пример. Условия прогнозируемого воздействия АЧ описано вектором входных параметров:  $x1^* = 9 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $x2^* = 45^\circ$ ,  $x3^* = 8 \text{ см}$ ,  $x4^* = 3 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $x5^* = 3 \text{ г/см}^3$ ,  $x6^* = 30 \text{ г}$ ,  $x7^* = 0,2 \text{ см}$ ,  $x8^* = 3 \text{ г/см}^3$ ,  $x9^* = 70 \text{ Мпа}$ ,  $x10^* = 0,04 \text{ см}$ ,  $x11^* = 1 \text{ г/см}^3$ .  $x12^* = 0,5 \text{ см}$ ,  $x13^* = 210 \text{ МПа (Н/мм}^2)$ .

Используя модель (3.8) и значения параметров b и c из табл.3.4 находим значения функций принадлежности в точках  $x_i^*$ ,  $i=1,12$  для всех нечетких термов (табл. 3.5).

Подставляя полученные значения в уравнение (3.8), находим:

$$\mu^H(y)=0,28 \cdot 0,44 \cdot 0,22 \cdot 0,366 \vee 0,28 \cdot 0,73 \cdot 0,58 \cdot 0,61 \vee 0,45 \cdot 0,73 \cdot 0,35 \cdot 0,36 = 0,22 \vee 0,28 \vee 0,35 = 0,35.$$

Аналогично:  $\mu^{HC}(y)=0,58$ ,  $\mu^C(y)=0,90$ ,  $\mu^{BC}(y)=0,90$ ,  $\mu^B(y)=0,63$

В соответствии с уравнением (3.7):

$$\mu^H(z)=0,87 \cdot 0,85 \cdot 0,99 \vee 0,87 \cdot 0,99 \cdot 0,99 \vee 0,98 \cdot 0,85 \cdot 0,99 = 0,87 \vee 0,87 \vee 0,85 = 0,87$$

Аналогично:  $\mu^{HC}(z)=0,97$ ,  $\mu^C(z)=0,52$ ,  $\mu^{BC}(z)=0,32$ ,  $\mu^B(z)=0,27$

В соответствии с уравнением (3.6):

$$\mu^H(g)=0,85 \cdot 0,92 \cdot 0,48 \cdot 0,86 \vee 0,99 \cdot 0,92 \cdot 0,48 \cdot 0,86 \vee 0,85 \cdot 0,84 \cdot 0,48 \cdot 0,99 = 0,48 \vee 0,48 \vee 0,48 = 0,48$$

Аналогично:  $\mu^{HC}(g)=0,79$ ,  $\mu^C(g)=0,71$ ,  $\mu^{BC}(g)=0,38$ ,  $\mu^B(g)=0,26$

Таблица 3.6- Значения функции принадлежности  $\mu^j(x_i^*)$

№	$X_i^*$	$U^*$	$\mu^H(x_i^*)$	$\mu^{HC}(x_i^*)$	$\mu^C(x_i^*)$	$\mu^{BC}(x_i^*)$	$\mu^B(x_i^*)$
1	9	3,43	0,24	0,39	0,64	0,95	0,92
2	45	1,00	0,79	1,00	0,79	0,48	0,29
3	8	3,11	0,28	0,45	0,75	1,00	0,82
4	3	2,16	0,44	0,73	0,99	0,84	0,52
5	3	3,64	0,22	0,35	0,58	0,90	0,97
6	30	2,54	0,36	0,61	0,93	0,95	0,63
7	0,2	0,76	0,87	0,98	0,71	0,42	0,26
8	3	0,80	0,85	0,99	0,72	0,43	0,27
9	70	0,17	0,99	0,84	0,52	0,32	0,20
10	0,04	0,80	0,85	0,99	0,72	0,43	0,27
11	1	0,57	0,92	0,95	0,64	0,38	0,24
12	0,5	2,00	0,48	0,79	1,00	0,79	0,48
13	210	0,78	0,86	0,99	0,71	0,43	0,26

В соответствии с уравнением (3.5) находим:

$$\mu^{d1}(d)=0,24 \cdot 0,29 \cdot 0,35 \cdot 0,52 \cdot 0,38 \vee 0,39 \cdot 0,48 \cdot 0,58 \cdot 0,32 \cdot 0,38 \vee 0,29 \cdot 0,79 \cdot 0,35 \cdot 0,27 \cdot 0,71 = 0,24 \vee 0,32 \vee 0,24 = 0,32.$$

$$\mu^{d2}(d)=0,39, \mu^{d3}(d)=0,79, \mu^{d4}(d)=0,76.$$

Поскольку наибольшее значение функции принадлежности соответствует критерию – пробой стенки, то наиболее возможным

результатом воздействия антропогенных частиц является пробитие стенки КА.

В качестве выборки для обучения прогнозированию результатов воздействия АЧ использовались результаты экспериментальных исследований по оценке поражающего действия высокоскоростных осколочных элементов (ОЭ) на материалы конструкции и жизненно-важных агрегатов КА.

В результате обучения получена настроенная нейро-нечеткая сеть, связи которой определяют параметры функций принадлежности ( $b$  и  $c$ ) из табл.3.7 и веса правил из табл. 3.8-3.10.

Таблица 3.7 Параметры  $b$  и  $c$  функций принадлежности после настройки

Пара метр	Н		нС		С		вС		В	
	$b$	$c$	$b$	$c$	$b$	$c$	$b$	$c$	$b$	$c$
x1	3.258	2.33	4.821	5.80	5.339	6.92	7.107	14.01	9.674	18.62
x2	-0.07	7.88	37.34	40.20	91.94	28.90	139.48	51.90	180.49	86.08
x3	1.00	0.761	3.25	0.985	5.50	0.386	7.75	1.421	10.00	0.064
x4	1.00	8.08	1.88	11.08	2.98	13.37	3.72	15.20	4.70	18.08
x5	0.90	0.82	1.67	1.50	2.16	7.92	2.74	8.88	3.19	10.14
x6	0.60	1.07	11.48	16.07	23.47	24.04	35.47	10.87	46.80	6.07
x7	0.12	0.055	0.237	0.026	0.352	0.179	0.412	0.079	0.53	0.066
x8	2.10	4.04	3.28	4.04	4.56	11.31	5.73	4.04	7.09	13.19
x9	60.00	3.15	114.3	7.8	170.1	17.9	220,4	25.96	300.18	31.2
x10	0.03	1.08	0.048	1.08	0.058	3.37	0.069	1.20	0.079	1.08
x11	0.01	0.62	1.67	3.50	3.16	7.92	4.94	8.88	6.96	10.14
x12	0.2	0.761	0.36	0.985	0.447	0.386	0.652	1.421	0.770	0.64
x13	139.87	57.31	236.3	87.84	335.2	80.39	432.7	109.6	539.33	162.7

Таблица 3.8 Веса правил в табл. 3.2 до ( $w_b$ ) и после ( $w_a$ ) настройки

У	$w_b$	$w_a$
Н	1.000	0.500
	1.000	0.500
	1.000	0.734
нС	1.000	0.500
	1.000	0.632
	1.000	0.500
С	1.000	0.757

	1.000	0.470
	1.000	0.473
вС	1.000	0.527
	1.000	0.480
	1.000	0.664
В	1.000	0.499
	1.000	0.806
	1.000	0.499

Таблица 3.9 Веса правил в табл.3.3 до (wb) и после (wa) настройки

Z	wb	wa
H	1.000	0.500
	1.000	0.744
	1.000	0.500
нС	1.000	0.500
	1.000	0.500
	1.000	0.400
С	1.000	0.500
	1.000	0.500
	1.000	0.565
вС	1.000	0.771
	1.000	0.500
	1.000	0.500
В	1.000	0.500
	1.000	0.500
	1.000	0.500

Таблица 3.10 Веса правил в табл.3.4 до (wb) и после (wa) настройки

g	wb	wa
H	1.000	0.500
	1.000	0.744
	1.000	0.500
нС	1.000	0.500
	1.000	0.500
	1.000	0.400
С	1.000	0.500
	1.000	0.500
	1.000	0.565
вС	1.000	0.771
	1.000	0.500
	1.000	0.500
В	1.000	0.500
	1.000	0.500
	1.000	0.500

Таблица 3.9 Веса правил в табл. 3.1 до (wb) и после (wa) настройки

	wb	wa
dl	1.000	0.934
	1.000	0.500
	1.000	0.419

d2	1.000	0.500
	1.000	0.500
	1.000	0.764
d3	1.000	0.428
	1.000	0.500
	1.000	0.724
d4	1.000	0.663
	1.000	0.449
	1.000	0.449

Обучение БЗ прогнозированию условий воздействия АЧ проводилось при фиксированных настройках синаптической карты ННС, по каждому критерию повреждения. Наборы примеров, полученных в процессе обучения сведены в таблицу 3.10.

Таблица 3.10 – Наборы данных полученные для прогнозирования условий

№	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	d
1	3	0	1	4,7	7,6	21	2,7	2,9	60	0,6	0,15	0,2	180	d3
2	2,7	11	1	4,7	7,8	18	1,9	2,9	68	0,4	1	0,24	200	d3
3	3,1	16	1	4,7	7,8	16	2,1	2,7	61	0,2	0,6	0,3	205	d3
4	2,4	3	2	4,7	7,6	14	1,1	2,7	72	1,7	0,3	0,21	220	d3
5	2,3	0	3	4,7	7,8	16	0,7	4,3	64	1,3	0,1	0,27	130	d3
6	2,7	8	3	4,7	7,8	18	0,45	4,1	66	1,6	3	0,26	203	d3
7	2	28	5	4,7	7,6		0,39	4,4	200	2	3,2	0,35	250	d2
8	2,5	20	3	4,7	7,8	11	0,15	4,9	187	1,8	4,5	0,4	210	d2
9	1,4	45	1	4,7	7,8	3,5	0,13	7	280	2,2	7	0,7	401	d1
10	1,1	41	1	4,7	7,6	3,0	0,17	6,9	269	2,2	6	0,8	380	d1
11	3,5	0	5	4,7	7,8	21	0,35	1,2	60	0,06	0,03	0,2	130	d4
12	3,3	0	7	4,7	7,8	18	0,47	1,4	60	0,07	0,04	0,21	130	d4

### 3.3 Реализация алгоритм оценки эффективности и выбора барьера безопасности при защите от антропогенных частиц

Работа системы рассмотрена для ситуации возможного столкновения с АЧ, при котором прогнозируется пробой стенки КА. При этом требуется

подключить барьер безопасности, оценив реализованные на борту меры по защите от АЧ [91].

Рассмотрено ограниченное множество альтернативных барьеров, сведенных в таблицу 3.11.

Таблица 3.11 - Множество барьеров безопасности КА

$s_1$	Выполнение маневра по уклонению (аварийной программы по подъему перигея на 20 км).
$s_2$	Развертывание в направлении налетающего АЧ защитного экрана.
$s_3$	Переход КА в дежурный режим (постоянной солнечной ориентации).

Для способов определим следующие параметры оценки:

- $c_1$  - оперативность способа;
- $c_2$  - экономичность способа;
- $c_3$  - результативность способа.

Избранное множество параметров не является замкнутым и может дополняться в зависимости от требований по защите КА.

1. По результатам проведения заблаговременной экспертизы получены высказывания по параметрам оценки барьера:

Оперативность барьера: явное преимущество  $s_3$  и  $s_2$  над  $s_1$

слабое преимущество  $s_3$  над  $s_2$

существенное преимущество  $s_1$  над  $s_2$

Экономичность барьера: явное преимущество  $s_1$  над  $s_3$

существенное преимущество  $s_2$  над  $s_3$

Результативность способа: существенное преимущество  $s_2$  над  $s_1$

почти явное преимущество  $s_1$  над  $s_3$

почти слабое преимущество  $s_2$  над  $s_3$

Экспертным высказываниям, приведенным выше, соответствуют матрицы парных сравнений, полученные с использованием шкалы Саати.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cccc}
 & s1 & s2 & s3 \\
 A(c_1) = & s1 & 1 & 7 & 7 \\
 & s2 & 1/7 & 1 & 3 \\
 & s3 & 1/7 & 1/3 & 1
 \end{array}
 \quad
 A(c_2) = \begin{array}{cccc}
 & s1 & s2 & s3 \\
 s1 & 1 & 1/5 & 1/7 \\
 s2 & 5 & 1 & 1/5 \\
 s3 & 7 & 5 & 1
 \end{array} \\
 \\
 A(c_3) = \begin{array}{cccc}
 & s1 & s2 & s3 \\
 s1 & 1 & 5 & 1/6 \\
 s2 & 1/5 & 1 & 1/2 \\
 s3 & 6 & 2 & 1
 \end{array}
 \end{array}$$

Пользуясь матрицами парных сравнений и формулой (5.12), получим

$$c1 = \left\{ \frac{0,125}{s1}, \frac{0,24}{s2}, \frac{0,68}{s3} \right\}$$

$$c2 = \left\{ \frac{0,75}{s1}, \frac{0,16}{s2}, \frac{0,08}{s3} \right\}$$

$$c3 = \left\{ \frac{0,16}{s1}, \frac{0,59}{s2}, \frac{0,11}{s3} \right\}$$

Пользуясь нечеткими множествами для  $c1-c3$  и моделью (2.26) получим:

$$K_s = \left\{ \frac{0,125}{s1}, \frac{0,16}{s2}, \frac{0,08}{s3} \right\},$$

что свидетельствует о предпочтении  $s2$  перед  $s1$  и  $s3$ .

2. При обнаружении объекта АЧ, который является потенциально опасным (в контексте сближения) с КА и по которому необходимо принять меры, реализовать барьер безопасности, необходимо уточнить оценки эффективности возможных барьеров.

На момент обнаружения АЧ КИИС КА в реальном времени рассчитывает требуемые исходные данные.

Временные характеристики возможного столкновения:

-время до возможного столкновения,  $t1$ ;

-время на выполнение каждой из реализованных на борту КА мер (барьера),  $t2$ ;

Вещественные характеристики возможного столкновения:

-запас топлива на борту КА,  $n1$ ;

-требуемый расход топлива для выполнения каждого из реализованных на борту КА мер (барьера),  $n_2$ ;

Вероятностные характеристики возможного столкновения:

-вероятность (риск) повреждения АЧ элементов или КА в целом,  $r_1$ ;

-вероятность сохранения функционала КА, которая определяет требования по действенности (надежности) барьера и дальнейшему функционированию КА,  $r_2$ .

Указанные параметры представляются лингвистическими переменными на основе которых составляются нечеткие правила, объединённые в базу знаний важности параметров.

В процессе функционирования КА задача оценки решается в цикле функционирования бортового комплекса управления с участием КИИС КА на основе нечеткого логического вывода с использованием базы знаний о важности параметров барьера.

Для проведения расчёта по каждому параметру используются правила вида:

Если Время до возможного столкновения = малое И Время на подключение барьера (комплекса мер) = среднее, ТО Оперативность = Очевидное превосходство;

Если Запас топлива на борту = большой И Требуемый расход топлива для барьера (комплекса мер) = малый, ТО экономичность = Умеренное (слабое) превосходство;

Если Вероятность столкновения = большая И Вероятность (риск) повреждения = большая И Вероятность сохранения функционала КА = большая, ТО Действенность (надежность) = Сильное (существенное) превосходство.

Таблица 3.12.

Важность параметра оперативности $c_1$		
$t_1$	$t_2$	Вывод по $c_1$
В	нС	<i>отсутствие преимущества</i>
вС	Н	
С	С	<i>слабое преимущество</i>
вС	С	



нС	С	<i>существенное преимущество</i>
С	вС	
нС	вС	<i>явное преимущество</i>
вС	В	
Н	В	<i>абсолютное преимущество</i>
Важность параметра экономичностьс2		
n1	n2	Вывод по с2
В	Н	<i>отсутствие преимущества</i>
В	нС	
вС	С	<i>слабое преимущество</i>
С	С	
нС	С	<i>существенное преимущество</i>
нС	вС	<i>явное преимущество</i>
С	вС	
Н	В	<i>абсолютное преимущество</i>
нС	В	
Важность параметра результативность с3		
r1	r2	Вывод по с3
Н	нС	<i>отсутствие преимущества</i>
Н	С	
нС	Н	<i>слабое преимущество</i>
нС	С	
С	нС	<i>существенное преимущество</i>
С	С	
вС	нС	<i>явное преимущество</i>
вС	С	
В	вС	<i>абсолютное преимущество</i>
В	В	

Всего в БЗ включено двадцать восемь продукционных правил.

Составленные на основе указанных правил, нечеткие логические уравнения определили для каждого параметра вывод соответствующий ему баллы по шкале Саати:

*с1-оперативность - существенное преимущество – 5 баллов;*

*с2-экономичность - слабое преимущество – 3 балла;*

*с3 – результативность (надежность) - явное преимущество – 7 баллов.*

Составим матрицу парных сравнений

	<i>с1</i>	<i>с2</i>	<i>с3</i>
<i>с1</i>	1	5/3	5/7
<i>с2</i>	3/5	1	3/7
<i>с3</i>	7/5	7/3	1

Используя формулу (2.26) рассчитаем  $f_j$ :

$$f_1 = \frac{1}{1+5/3+5/7} = 0,29$$

$$f_2 = \frac{1}{3/5+1+3/7} = 0,49$$

$$f_3 = \frac{1}{7/5+7/3+1} = 0,21$$

а оценки параметров с учетом рангов:

$$c1 = \left\{ \frac{0,125^{0,29}}{s1}, \frac{0,24^{0,29}}{s2}, \frac{0,68^{0,29}}{s3} \right\} = \left\{ \frac{0,55}{s1}, \frac{0,66}{s2}, \frac{0,89}{s3} \right\}$$

$$c2 = \left\{ \frac{0,75^{0,49}}{s1}, \frac{0,16^{0,49}}{s2}, \frac{0,08^{0,49}}{s3} \right\} = \left\{ \frac{0,87}{s1}, \frac{0,41}{s2}, \frac{0,29}{s3} \right\}$$

$$c3 = \left\{ \frac{0,16^{0,21}}{s1}, \frac{0,59^{0,21}}{s2}, \frac{0,11^{0,21}}{s3} \right\} = \left\{ \frac{0,68}{s1}, \frac{0,89}{s2}, \frac{0,63}{s3} \right\}$$

Эффективность барьера безопасности определяется:

$$K_s = \left\{ \frac{0,55}{s1}, \frac{0,41}{s2}, \frac{0,29}{s3} \right\},$$

что характеризует эффективность барьера с учетом условий обстановки, определяемых располагаемым и требуемым запасом топлива и временем, а также требованиями по результативности (надежности) защиты КА.

Существует предпочтение в реализации барьера  $s1$  в условиях доминирования требования по надежности защиты КА от указанного объекта АЧ.

### **3.4. Оценка результатов реализации методики построения базы знаний комплексной интеллектуальной информационной системы защиты от антропогенных частиц**

Обучающая выборка для оценки результатов обучения БЗ по прогнозированию включала данные по 20 выстрелам. Каждый пример это вектор значений входных параметров и соответствующий ему результат повреждения КА (см. табл. 3.10). После обучения БЗ прогнозированию результатов воздействия АЧ проведена оценка результатов, на основе тестирования БЗ контрольной выборкой. Для этого использовался метод “скользящего экзамена”: из обучающей выборки случайным образом извлекался один пример, по оставшимся примерам проводилось обучение БЗ,

после чего проверялся результат прогноза выбранного примера. Процедура повторялась до полного перебора всех примеров обучающей выборки.

Для оценки результатов прогнозирования определялась вероятность правильного прогноза по каждому из критериев повреждения и осредненная вероятность правильного прогнозирования по всем повреждениям.

Анализ результатов тестирования БЗ (табл. 3.13 показывает, что в 5-ти случаях (\*\*)) результаты прогноза по повреждениям, полученные при моделировании отличаются от данных проведенных испытаний. Это свидетельствует о высоком, с точки зрения практического использования, качестве обучения БЗ КИИС в прогнозировании результатов воздействия АЧ.

Таблица 3.13 Результаты тестирования фрагмента БЗ контрольной выборкой

№	Параметры условий взаимодействия АЧ и КА													Критерий повреждения	
	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	1)	2)
1	3	0	1,4	3,16	7,8	3,5	3	2,8	115	3	2,8	0,5	334	d3	d3
2	3	45	1,7	3,01	7,8	8,4	3	2,8	115	3	2,8	0,5	334	d3	d3
3	3	0	1,3	3,07	7,8	3,5	2	4,45	300	2	4,45	0,2	850	d3	d3
4	3	0	1,6	2,93	7,8	8,4	2	4,45	300	2	4,45	0,2	850	d3	d3
5	3	0	3,4	3,04	7,8	8,4	3	2,8	115	6	1,54	0,8	-	d3	d3
6	3	0	3,5	3,04	7,8	8,4	3	2,8	115	6	1,54	0,8	-	d3	d3
7	3	0	3,8	3,10	7,8	8,4	2	4,45	300	6	1,54	0,8	-	d3	d3
8	3	0	3,8	3,21	7,8	8,4	3	2,8	115	12	1,54	0,8	-	d3	d3
9	3	0	3,2	3,09	7,8	8,4	2	4,45	300	12	1,54	0,8	-	d3	d3
10	3	0	3,4	2,77	7,8	8,4	3	2,8	115	6	1,54	0,8	-	d3	d2**
11	3	0	2,7	1,35	7,8	8,4	3	2,8	115	6	1,54	0,8	-	d3	d4
12	3	0	1,1	1,61	7,8	3,5	3	2,8	115	12	1,54	0,8	-	d3	d4
13	3	0	2,8	1,56	7,8	8,4	2	4,45	300	6	1,54	0,8	-	d3	d4**
14	3	0	2,1	1,57	7,8	8,4	2	4,45	300	12	1,54	0,8	-	d3	d1
15	3	0	1,5	1,48	7,8	3,5	3	2,8	115	6	1,54	0,8	-	d3	d4**
16	3	0	1,7	1,46	7,8	8,4	5,5	2,8	115	22	1,54	0,5	334	d3	d2
17	3	0	1,8	1,47	7,8	3,5	5,5	2,8	115	22	1,54	0,5	334	d3	d3
18	3	0	1,0	1,48	7,8	3,5	5,5	2,8	115	22	1,54	0,2	334	d3	d3
19	3	0	3,6	2,9	7,8	8,4	5,5	2,8	115	22	1,54	0,2	334	d3	d3
20	3	0	2,5	3,2	7,8	3,5	5,5	2,8	115	22	2,8	0,8	334	d3	d4**
21	3	0	2,7	1,35	7,8	3,5	2	2,8	115	2	2,8	0,8	850	d1	d1
22	3	0	1,1	1,61	7,8	3,5	3	4,45	300	2	4,45	0,8	850	d2	d2
23	3	0	2,8	1,56	7,8	8,4	3	4,45	115	6	4,45	0,8	-	d2	d2
24	3	0	2,1	1,35	7,8	3,5	3	2,8	115	6	1,54	0,8	-	d1	d1
25	3	0	1,8	1,47	7,8	8,4	2	4,45	115	6	1,54	0,5	-	d1	d1
26	3	0	1,0	1,48	7,8	8,4	5,5	4,45	115	2	1,54	0,5	-	d1	d1
27	3	0	3,6	3,01	7,8	8,4	5,5	2,8	300	2	1,54	0,5	-	d2	d2
28	3	45	2,5	3,07	7,8	3,5	3	2,8	300	6	1,54	0,2	-	d1	d2**
29	3	0	4,7	3,5	7,8	21	3	2,8	115	2	2,8	0,2	-	d4	d4
30	3	0	4,7	3,5	7,8	19	2	2,8	115	2	2,8	0,2	-	d4	d4

1) данные по проведенным испытаниям

2) результаты моделирования в БЗ КИИС

Динамика обучения базы знаний прогнозирования результатов воздействия АЧ представлена на рис.3.13, где  $P_j$  и  $P^*$ - вероятности безошибочного прогнозного критерия ( $j=1,..,4$ ) и осредненная вероятность безошибочного прогнозирования по всем повреждениям,  $N$ - объем обучающей выборки по устраненным повреждениям.

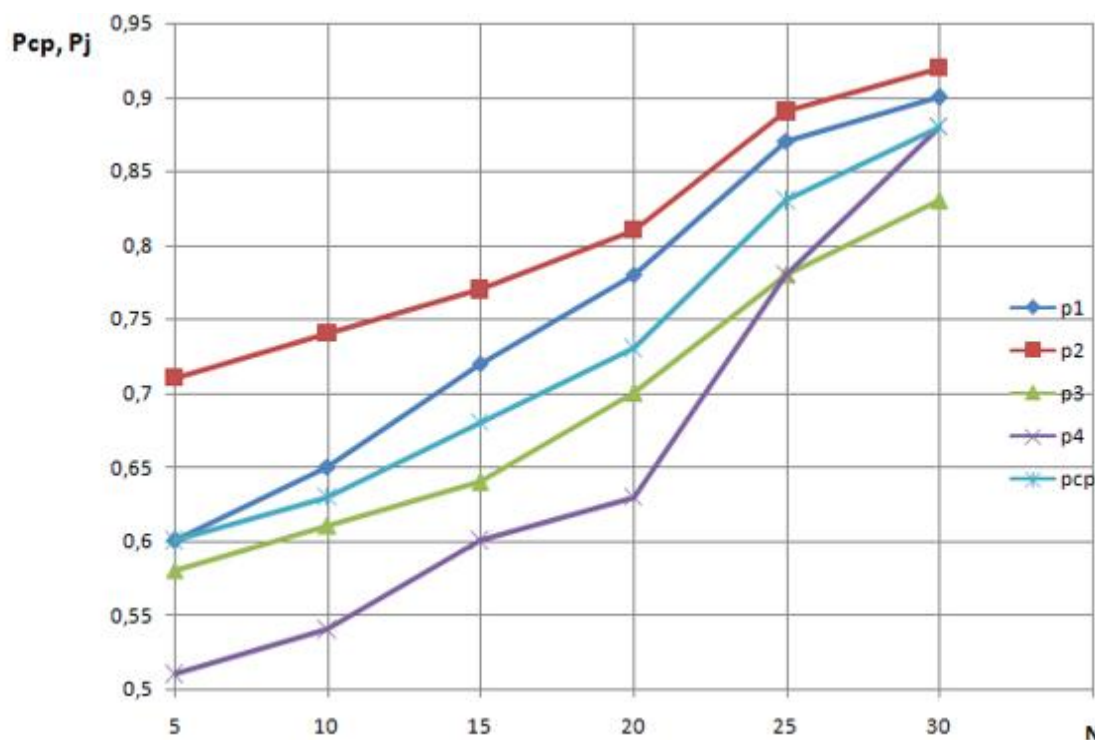


Рис.3.13 Динамика обучения БЗ прогнозированию результатов воздействия АЧ,  $P_j$ ,  $P^*$

Результаты обучения БЗ сведены в таблицу 3.14.

Таблица 3.14 -Результаты обучения БЗ

Критерии повреждения	Вероятность безошибочного прогнозирования до обучения БЗ	Вероятность безошибочного прогнозирования после обучения БЗ
d1	0,60	0,90
d2	0,71	0,92
d3	0,58	0,83
d4	0,51	0,88
осредненная	0,60	0,88

Достоверность результатов прогноза определялась на основе оценки вероятности безошибочного прогнозирования по частоте [92]. Решалась задача определения 95% -го доверительного интервала для осредненной

вероятности безошибочного прогноза ( $P^*$ ). Доверительные границы составили  $p_1 = 0,776$  и  $p_2 = 0,944$ . Таким образом, доверительный интервал  $[0,776; 0,944]$  с вероятностью  $0,95$  определяет результат безошибочного прогнозирования результата воздействия АЧ в решаемой задаче.

### **3.5. Расчет живучести автономного функционирования оптико-электронной системы методом структурно-логических схем**

Под живучестью понимается способность КА не терять своей работоспособности при возникновении условия (аномальные ситуации), не предусмотренных эксплуатационно-технической документацией (ЭТД), когда для сохранения работоспособности системы требуется изменять взаимосвязи её структурных элементов, их функции и режимы работы. Расчет живучести автономного функционирования проведен методом структурно-логических схем [93]. Структурно-логическая схема учитывает тот факт, что работоспособность КА может обеспечиваться множеством способов.

КИИС защиты от антропогенных частиц имеет в своем составе подсистему обнаружения и распознавания частиц, опасных по критерию сближения, подсистему прогнозирования результатов воздействия АЧ и подсистему выбора барьера безопасности. При этом КА не всегда может быть поврежден (отказаться) при попадании в него частиц АЧ.

Рассмотрим следующие события:

- обн. - обнаружение АЧ, с которым возможно столкновение;
- ув. – проведение маневра уклонения с АЧ (увод от столкновения);
- прог. – прогнозирование результата воздействия АЧ;
- бар. – оценка эффективности и применение активного барьера, обеспечивающего защиту с учетом складывающейся обстановки;
- ж. – использование только пассивной защиты, определяющей исходную выживаемость КА при попадании АЧ.

Рассмотрим два варианта обеспечения безопасности КА в этих условиях.

1. На борту решается задача обнаружения АЧ, увода КА от столкновения и применяется пассивная защита обеспечивающая выживаемость КА при попадании АЧ, при этом прогноз и выбор барьера не проводятся.

Структурно-логическая схема 1 выживаемости КА в этих условиях представлена на рис. 3.14.

На этой схеме горизонтальные цепочки представляют собой возможные пути выживаемости КА:

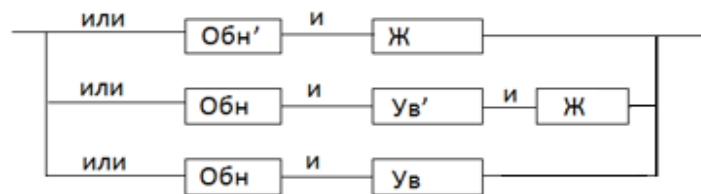


Рис. 3.14 - Структурно-логическая схема 1 выживаемости КА

На основе этой схемы составим логическую функцию выживаемости КА:

$$Y = \text{обн}' \cdot \text{ж} \vee \text{обн} \cdot \text{ув}' \cdot \text{ж} \vee \text{обн} \cdot \text{ув}$$

Анализ этой функции показывает, что она находится в ортогональной дизъюнктивной нормальной форме (ОДНФ), поэтому перейдем к вероятностной функции выживания методом замещения

$$P(Y) = (1 - p_{\text{обн}})p_{\text{ж}} + p_{\text{обн}}(1 - p_{\text{ув}})p_{\text{ж}} + p_{\text{обн}}p_{\text{ув}}$$

При исходных данных  $p_{\text{обн}}=0,9$ ,  $p_{\text{ув}}=0,6$ ,  $p_{\text{ж}}=0,1$  получим расчетное значение:

$$P(Y) = 0,1 \cdot 0,1 + 0,9 \cdot 0,4 \cdot 0,1 + 0,9 \cdot 0,6 = 0,505$$

2. На борту развернута КИИС и функционально решаются перечисленные задачи, а также проводится прогнозирование результатов воздействия АЧ, оценка эффективности и выбор барьера безопасности.

Тогда структурно-логическая схема выживаемости КА примет вид (рис. 3.15)

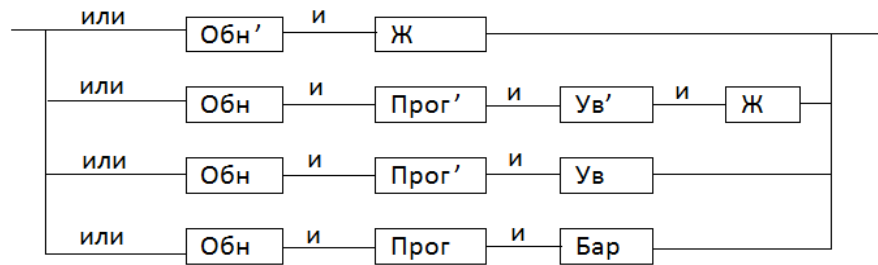


Рис. 3.15 - Структурно-логическая схема 2 выживаемости КА

Составим логическую функцию выживаемости КА:

$$Y = \text{обн}' \cdot \text{ж} \vee \text{обн} \cdot \text{прог}' \cdot \text{ув}' \cdot \text{ж} \vee \text{обн} \cdot \text{прог}' \cdot \text{ув} \vee \text{обн} \cdot \text{прог} \cdot \text{бар}$$

Вероятностная функция выживаемости КА будет рассчитана по формуле:

$$P(Y) = (1 - p_{\text{обн}})p_{\text{ж}} + p_{\text{обн}}(1 - p_{\text{прог}})(1 - p_{\text{ув}})p_{\text{ж}} + p_{\text{обн}}(1 - p_{\text{прог}})p_{\text{ув}} + p_{\text{обн}}p_{\text{прог}}p_{\text{бар}}$$

Для исходных данных  $p_{\text{обн}}=0,9$ ,  $p_{\text{ув}}=0,6$ ,  $p_{\text{прог}}=0,8$ ,  $p_{\text{бар}}=0,5$ ,  $p_{\text{ж}}=0,1$  получим расчетное значение:

$$P(Y) = (1 - 0,9)0,1 + 0,9(1 - 0,6)(1 - 0,8)0,1 + 0,9 \cdot (1 - 0,8) \cdot 0,6 + 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,5 = 0,557$$

Таким образом, выживаемость КА увеличится от 0,1, при использовании только пассивной защиты до 0,505, при проведении маневра уклонения по каждому обнаруженному АЧ и далее до 0,557 с использованием КИИС (с учетом вероятностей обнаружения и прогнозирования результатов воздействия АЧ, а также оценки эффективного и выбора барьера безопасности).

#### Анализ чувствительности элементов системы

Анализ чувствительности элементов рассматриваемой системы проведена на основе понятия «значимость».

Значимость элемента в системе есть частная производная от вероятности безотказной работы (или отказа) системы  $P_c$  по вероятности безотказной работы (или вероятности отказа) элемента  $P_i$ , то есть

$$\chi_i = \frac{\partial P_c}{\partial p_i}.$$

В теории логико-вероятностных методов доказано, что производная от вероятностной функции, полученной с помощью методов алгебры логики

численно равна разности вероятности работоспособного состояния системы, когда элемент находится в работоспособном состоянии, и вероятности работоспособного состояния системы, когда рассматриваемый элемент находится в состоянии отказа [93], то есть

$$\chi_i = \frac{\partial P_c}{\partial p_i} = P_c(x_i = 1) - P_c(x_i = 0)$$

Тогда значимость рассмотренных элементов системы составит:

$$\begin{aligned} \chi_{обн} &= [(1-1)p_{жс} + 1(1-p_{прог})(1-p_{ув}) p_{жс} + 1(1-p_{прог}) p_{ув} + 1p_{прог}p_{бар}] - \\ &- [(1-0)p_{жс} + 0(1-p_{прог})(1-p_{ув}) p_{жс} + 0(1-p_{прог}) p_{ув} + 0 \cdot p_{прог}p_{бар}] = \\ &= [0,2 \cdot 0,4 \cdot 0,1 + 0,2 \cdot 0,6 + 0,8 \cdot 0,6] - 0,1 = 0,608 - 0,1 = 0,598 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \chi_{ув} &= [(1-p_{обн})p_{жс} + p_{обн}(1-p_{прог})(1-1) p_{жс} + p_{обн}(1-p_{прог}) \cdot 1 + p_{обн}p_{прог}p_{бар}] - \\ &- [(1-p_{обн})p_{жс} + p_{обн}(1-p_{прог})(1-0) p_{жс} + p_{обн}(1-p_{прог}) \cdot 0 + p_{обн}p_{прог}p_{бар}] = \\ &= [0,1 \cdot 0,1 + 0,9 \cdot 0,2 + 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,6] - [0,1 \cdot 0,1 + 0,9 \cdot 0,2 \cdot 0,1 + 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,6] = 0,162 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \chi_{прог} &= [(1-p_{обн})p_{жс} + p_{обн}(1-1)(1-p_{ув}) p_{жс} + p_{обн}(1-1) p_{ув} + p_{обн} \cdot 1 \cdot p_{бар}] - \\ &- [(1-p_{обн})p_{жс} + p_{обн}(1-0)(1-p_{ув}) p_{жс} + p_{обн}(1-0) p_{ув} + p_{обн} \cdot 0 \cdot p_{бар}] = 0,335 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \chi_{бар} &= [(1-p_{обн})p_{жс} + p_{обн}(1-p_{прог})(1-p_{ув}) p_{жс} + p_{обн}(1-p_{прог}) p_{ув} + p_{обн}p_{прог} \cdot 1] - \\ &- [(1-p_{обн})p_{жс} + p_{обн}(1-p_{прог})(1-p_{ув}) p_{жс} + p_{обн}(1-p_{прог}) p_{ув} + p_{обн}p_{прог} \cdot 0] = 0,720 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \chi_{жс} &= [(1-p_{обн}) \cdot 1 + p_{обн}(1-p_{прог})(1-p_{ув}) \cdot 1 + p_{обн}(1-p_{прог}) p_{ув} + p_{обн}p_{прог}p_{бар}] - \\ &- [(1-p_{обн}) \cdot 0 + p_{обн}(1-p_{прог})(1-p_{ув}) \cdot 0 + p_{обн}(1-p_{прог}) p_{ув} + p_{обн}p_{прог}p_{бар}] = 0,172 \end{aligned}$$

Наиболее значимой является функция оценки эффективности и выбора барьера безопасности с учетом складывающейся обстановки. Поэтому, чтобы повысить вероятность выживания КА, необходимо в первую очередь обеспечить безошибочный выбор эффективного барьера безопасности КА для текущих условий обстановки.



### Выводы по главе

Экспериментальное исследование методики построения БЗ КИИС проводилось на средствах программно-технического комплекса. Для демонстрации возможностей методики была разработана база знаний для прогнозирования результатов воздействия АЧ и выбора управляющего воздействия.

Реализация алгоритма обучения БЗ прогнозирования результатов воздействия АЧ была призвана показать повышение качества определения возможного критерия повреждения КА на основе автоматизации использования имеющихся данных по испытаниям защитных характеристик материалов КА. Обучающая выборка для прогнозирования повреждений включала 20 примеров по результатам высокоскоростного воздействия объектов. Каждый пример это вектор значений параметров на входе и соответствующий ему критерий повреждения (см. табл. 3.10). После обучения БЗ прогнозирования результатов воздействия АЧ проведена оценка результатов, на основе тестирования БЗ контрольной выборкой. Для этого использовался метод “скользящего экзамена”: из обучающей выборки случайным образом извлекался один пример, по оставшимся примерам проводилось обучение БЗ, после чего проверялся результат прогнозирования повреждения КА для примера. Процедура повторялась до полного перебора всех состояний обучающей выборки.

Для оценки результатов прогноза определялась вероятность правильного прогнозирования для каждого из критериев повреждения и осредненная вероятность правильного прогнозирования по всем возможным критериям. Результаты сведены в таблицу 3.14.

Для оценки достоверности прогноза был определен интервал  $[0,776; 0,944]$ , который с доверительной вероятностью 0,95 определяет результат правильного прогноза результатов воздействия АЧ.

Реализация алгоритма оценки эффективности и выбора барьера безопасности позволила определить рациональный вариант защиты КА для

текущих условий обстановки. Учет текущих условий обстановки проводился на основе оценки важности параметров барьера безопасности в автоматическом режиме, без участия человека оператора с использованием БЗ важности параметров.

На этапе прогноза результатов воздействия частицы был определен наиболее возможный критерий повреждения КА для обнаруженного объекта АЧ.

На этапе выбора барьера безопасности исходное множество мер реализованных для защиты КА было оценено с учетом важности параметров их оценки и определен эффективный барьер безопасности.

Применение КИИС повлияло на живучесть автономного функционирования КА. Так выживаемость в условиях воздействия АЧ определяется надежностью технических средств КА, а его долговечность равняется времени активного существования, что подтверждает достижение цели проведенного исследования.

Результаты проведенных исследований подтвердили правильность разработанных методики и алгоритмов разработанных в диссертации:

1. Методика позволяет успешно прогнозировать результаты воздействия АЧ и определять наиболее эффективный барьер безопасности КА в различных условиях обстановки;

2. Повышение качества прогноза обусловлено возможностью использования данных по результатам испытаний и прогнозируемым условиям сформированных системой. Становится возможным выполнение требования к поддержанию БЗ в актуальном состоянии при прогнозировании, при этом время процедуры обучения (дообучения) проводится в автоматическом режиме.

3. Повышение качества оценки эффективности барьера безопасности обусловлено возможностью учитывать в автоматическом режиме важности параметров оценки барьера, определяемых текущими условиями обстановки.

## Заключение

Разработка и внедрение КИИС в состав бортовых средств КА находится на начальном этапе, и это связано в первую очередь с трудностями практического характера.

Специалисты, занимающиеся испытаниями характеристик защиты материалов КА, обладают огромной по масштабам и весьма ценной по содержанию информации в прогнозах по результатам воздействия АЧ и способах защиты от них. Однако насколько богаты запасы их памяти, настолько скуп их язык, когда они знакомят с этими запасами других людей. Поэтому наиболее трудной задачей разработки КИИС является, задача извлечения информации, ее актуализации, систематизации, т.е. связанная с формированием модели знаний по восстановлению работоспособности средств.

Когда знания получены, разработчик КИИС может обратиться к многообразию теоретических методов их формализации, при этом точность и трудоемкость реализации метода должны соответствовать полноте и точности исходной информации, полученной от специалистов-экспертов.

И, наконец, вопросы, связанные с поддержанием КИИС в актуальном состоянии и накопление знаний. И структура КИИС, и метод обработки знаний, и программная реализация модели знаний должны обладать достаточной гибкостью и возможностями адаптации к использованию вновь полученных знаний.

Исследование проводилось с целью повышения надежности автономного функционирования КА на основе построения БЗ КИИС.

Основные результаты, полученные в диссертации, заключаются в следующем.

1. Проведен анализ условий воздействия АЧ на автономно функционирующий КА. Установлено, что объекты размером менее 10 см не наблюдаются наземными средствами и могут быть обнаружены только оптическими датчиками, размещаемыми на борту КА. Обеспечение

безопасности КА в этих условиях требует автоматического решения спектра задач, центральными из которых являются прогнозирование результатов возможного воздействия АЧ и построение эффективного барьера безопасности КА от такого воздействия.

2. Показано, что влияние основных параметров взаимодействия КА и АЧ не может быть представлен в виде единых детерминированных аналитических выражений т. к. физика процесса заключается в коэффициентах получаемых формул, что приводит к необходимости их постоянной настройки и верификации моделей. В тоже время накопленные данные по экспериментальным исследованиям и имеющиеся модели позволяют выявить общие зависимости и влияние параметров удара на результат связанный с повреждением КА. Анализ результатов позволил сформулировать полученные знания в виде высказываний на естественном языке, используя ограниченное множество параметров и их нечеткие значения (например: скорость взаимодействия в точке встречи - низкая, масса частицы АЧ - малая, текущий запас топлива - большой). Сделан вывод о необходимости использования логико-лингвистического подхода при построении КИИС по обеспечению безопасности КА от воздействий АЧ.

3. Установлена объективная необходимость разработки методики построения БЗ КИИС по обеспечению безопасности КА от воздействий АЧ. Для повышения качества решения задач прогнозирования результатов воздействия АЧ и выбора наилучшего барьера безопасности для текущих условий обстановки предложено проводить автоматизированное обучения БЗ по изменениям в предметной области.

Под автоматизацией обучения базы знаний понимается процесс использования имеющихся данных по результатам гипервысокоскоростного взаимодействия частиц (полученных в ходе наземных испытаний и в космосе) и важности параметров барьера безопасности, оцененных применительно к конкретным условиям обстановки, позволяющий в

реальном масштабе времени последовательно минимизировать отклонения фактического результата защиты КА от требуемого.

4. Разработана модель знаний по обеспечению безопасности КА от воздействия АЧ. Множество ситуаций (состояний, определяемых параметрами взаимного положения и движения КА и АЧ) при возможном столкновении структурировано на основе матрицы знаний с использованием нечетких параметров состояния и возможных барьеров безопасности. На основе анализа известных моделей знаний определено, что для построения модели знаний по обеспечению безопасности КА, целесообразно использовать гибридный формализм представления знаний. Была разработана специальная семантическая нейро-нечеткая сеть, сочетающая в себе достоинства нечетких множеств и нейронных сетей.

Отличительной особенностью модели знаний, является:

- использование лингвистических переменных с ограниченными терм множествами значений для описания параметров параметрами взаимного положения и движения КА и АЧ;

- разработанная нейро-нечеткая сеть, изоморфная совокупности сформулированных прогнозных правил, позволяющая использовать высказывания экспертов по прогнозированию результатов воздействия АЧ и проводить обучение БЗ в масштабе времени близком к реальному;

- разработанная семантическая сеть, позволяющая учитывать при оценке эффективности барьера безопасности априорные экспертные оценки по каждому параметру и важность указанных параметров в конкретных условиях опасности АЧ.

5. Методики построения БЗ КИИС защиты от антропогенных частиц, которая в отличие от известных имеет новый показатель, порядок его вычисления и новые элементы структуры: алгоритм обучения БЗ прогнозирования условий и результатов воздействия АЧ на КА и алгоритм оценки эффективности барьера безопасности.

6. Алгоритм обучения БЗ по прогнозированию условий и

результатов воздействия АЧ на КА построен по технологии двойственной сети, построенной для нейро-нечеткой сети и реализует метод обратного распространения ошибки.

Применение двойственной сети позволило:

- проводить обучение БЗ прогнозированию результатов воздействия АЧ на примерах. Примерами являются накопленные данные по экспериментальным исследованиям, объединяющие вектор параметров состояния и соответствующий ему барьер безопасности;

- проводить обучение БЗ прогнозированию условий воздействия АЧ в виде векторов параметров состояния, сформированных в процессе обучения входного слоя сети.

7. Проведено описание барьера безопасности на основе задания параметров оценки (оперативность, экономичность, реализуемость (надежность) и их важности. Параметры барьера и их важность представлены нечеткими множествами с использованием алгоритма формирования функций принадлежности параметров оценки барьера (их важности) на основе модифицированного метода Саати, в котором нет процедуры решения характеристических уравнений матрицы парных сравнений.

8. В известных работах выбор барьера проводится на основе только заблаговременной оценки эффективности известных барьеров. При этом возникает существенное ограничение вариантного подхода связанное с возможными отличиями прогнозируемых и текущих условий обстановки. Разработан алгоритм оценки эффективности барьера безопасности, отличающаяся от известных возможностью учитывать условия обстановки, формулируемые непосредственно при угрозе столкновения.

Учет текущих условий обстановки предлагается осуществлять посредством автоматического изменения важности параметров в зависимости от этих условий. Разработанная база знаний (БЗ) важности параметров позволяет проводить оценку эффективности барьера безопасности с учетом складывающейся обстановки по каждому потенциально опасному (по

критерию опасного сближения) объекту в цикле автоматического функционирования бортовой вычислительной машины управления.

9. Разработана система, реализующая предложенную методику построения базы знаний. Реализованы алгоритмы механизма логического вывода решений.

10. Для подтверждения правильности теоретических положений работы в 3 главе представлен результат по обнаруженному объекту АЧ и принятым мерам (автоматически подключаемому барьеру безопасности) по защите КА от воздействия АЧ.

Полученные результаты показывают, что использование КИИС с разработанной БЗ позволяет использовать барьер безопасности, исключая ошибочные решения, что повышает живучесть автономного функционирования КА.

Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение внедрены в рабочий процесс АО «РТИС ВКО», в учебный процесс ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет на кафедре «Радиотехнические информационные системы».

Диссертационная работа выполнена в рамках прикладных научных исследований на тему «Теория и адаптивные алгоритмы обнаружения антропогенных частиц и объектов и оценка их динамического взаимодействия с космическими аппаратами на основе интеллектуального анализа данных», шифр «2.1777.2017/4.6» ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет» и Министерство Образования и Науки Российской Федерации.

## Список литературы

- 1 Соколов Н.Л., Захаров П.А Автономная идентификация параметров орбит потенциально опасных космических объектов бортовыми средствами //Вестник московского государственного университета леса - лесной вестник, №2, 2016, с214-224.
- 2 Зыков И.И. Методы и алгоритмы обнаружения антропогенных частиц в сложных фоновых условиях функционирования оптико-электронных систем /дис. к.т.н., Тверь. ТвГТУ, 2018, с.114.
- 3 Лукин В.Н. Введение в проектирование баз данных/В.Н. Лукин.-М.: Вузовская книга, 2015.-144.
- 4 Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем: учебное пособие. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
- 5 Юрин А.Ю., Грищенко М.А. Редактор баз знаний в формате CLIPS // Программные продукты и системы. 2012. №4 (100). С. 84-87.
- 6 Системы управления базами данных и знаний. /Под ред. А.Н.Наумова. М., 1991.
- 7 Использование интеллектуальных систем в управлении космическими аппаратами [Электронный ресурс] / Соколов, Селезнева, Корниенко // Лесной вестник. Forestry Bulletin -2015 .- №3 - С. 28-35 - Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/416833>.
- 8 Элементы системы управления знаниями для подготовки разработчиков комплексов навигационно- баллистического обеспечения космических объектов [Электронный ресурс] / В.В. Бетанов, Назаренко // Проблемы экономики и юридической практики .— 2016 .— №6 .— С. 131-133 .— Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/563777ю>
- 9 Соколов Н.Л., Захаров П.А. Информационно-аналитическое обеспечение автономного управления космическими аппаратами // Проблемы управления №6, 2015 г. с.69ю
- 10 В.Г. Лаврентьев, И.И. Олейников. Автоматизированная система



предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве, ЦИИМАШ

<http://www.astronomer.ru/data/0060/ASPOS.pdf>

11. ОСТ 134-1031-2003 Изделия космической техники. Общие требования по защите космических средств от механического воздействия частиц естественного и техногенного происхождения.
12. Destefanis R., Amerio E., Briccarello M., Belluco M., Faraut M., Tracino E., Lobascio C. Space environment characterisation of Kevlar®: good for bullets, debris and radiation too // *Universal Journal of Aeronautical & Aerospace Sciences*. 2014. Vol. 2. P. 80.
13. Destefank D., Lambert M., Schfer F., Drolshagen G., Francesconi D. Debris shielding development for the ATV integrated cargo carrier // *Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris (18-20 April 2005, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany)*. Europeans Space Agency, 2005. P. 453-458. Режим доступа: <http://adsabs.harvard.edu/full/2005ESASP.587453D> 2-4.
14. Зеленцов В.В. Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора. *Наука и Образование: Научное издание*. 2015;(6):123-142. DOI:10.7463/0615.0778339]
15. Патент РФ на изобретение №2294866 «Способ защиты космических объектов». МПК В64G 1/52, В64G 1/56, опубл. 10.03.2007 г, бюл. №7, <http://www.findpatent.ru/patent/253/2532003.html>.
16. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. *Материалы и структуры легкой бронезащиты*. М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 191 с.
17. Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. Защита космических аппаратов от антропогенных и естественных осколков, эксперимент и численное моделирование // *Вестник Томского Государственного университета. Математика и механика*. 2011. № 4 (16). С. 70-78.
18. Ryan S., Christiansen E.L. NASA/TM-2009-000000.Honeycomb vs. Foam: Evaluating a Potential Upgrade to ISS Module Shielding for

- Micrometeoroids and Orbital Debris. NASA, 2009.]
- 19 Степанов Э.С., Соломонов Ю.С., Сычев М.П. Кинетическое воздействие на летательные аппараты. 1-е-е изд. Т. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 112 с.
  - 20 Gong Z. Hypervelocity Impacts and Protection Research in CAST.Beijing Orbital Debris Mitigation Workshop. 2010. 130 pp.
  - 21 Smith J.C. The use of shock physics to predict the mechanics of hypervelocity impact // Doctoral Thesis. Rice University. 2000. URL: <http://hdl.handle.net/1911/19557> (дата обращения: 28.09.2017).
  - 22 Hayhursts C.J. Hayhurst C.J. Multi-Physics Analysis of Hypervelocity Impact: Successes and Challenges, FE NET, 2003.
  - 23 Ryan S., Wakelin M., Maritz A., Riedel W., Schafer F., Thomas K. Theoretical Prediction of Dynamic Composite Material Properties for Hypervelocity Impact Simulations // International Journal of Impact Engineering , 2009.
  - 24 Ryan S. Hypervelocity Impact Induced Disturbances on Composite Sandwich Panel Spacecraft Structures.. Thesis of the Degree of Doctor of Philosophy. 2007. 228 pp.
  - 25 Schonberg W.P. The Development of Ballistic Limit Equations for Dual-Wall Spacecraft Shielding: A Concise History and Suggestions for Future Development // 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Schaumburg. 2008].
  - 26 Липанов А.М., Вахрушев А.В., Федотов А.Ю. Исследование динамического взаимодействия твердых тел методами математического моделирования // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». 2005. Т. 8. № 1. С. 53-65
  - 27 Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Theory Manual. Livermore, CA. 2006
  - 28 Зелепугин С.А., Коняев А.А., Сидоров В.Н. Экспериментально-

- теоретическое исследование группы частиц с элементами защиты космических аппаратов // Космические исследования, Т. 46, № 6, 2008. С. 559-570
- 29 Герасимов А.В., Пашков С.В. Численное моделирование группового удара высокоскоростных элементов по космическому аппарату // Вестник Томского университета. 2014. № 3. С. 57-64.
- 30 ОСТ 134-1031-2003 Общие требования по защите космических средств от механического воздействия частиц естественного и техногенного происхождения.
- 31 Куренков В.И. Оценка метеорно-техногенной опасности полета космического аппарата [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Л.Г. Лукашев, Л.П. Юмашев, В.И. Куренков.— Самара : Издательство СГАУ, 2004 — 67 с
- 32 Миронов В.В., Толкач М.А. Баллистические предельные уравнения для оптимизации системы защиты космических аппаратов от микрометеороидов и космического мусора // Космическая техника и технологии. 2016. Vol. 14. No. 3. pp. 26-42.
- 33 Meteoroid and debris models / ESA Requirements and Standards Division. ESTEC, P.O. Box 299, 2200. AG Noordwijk, The Netherlands. URL: <https://www.spENVIS.oma.be/help/background/metdeb/metdeb.html> (дата обращения: 10.04.2017).
- 34 Добрица Д.Б. К вопросу расчета стойкости элементов конструкции космического аппарата при воздействии частиц космического мусора // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. Т. 16. № 5. С. 53-58.
- 36 Добрица Д.Б. К вопросу расчета стойкости элементов конструкции космического аппарата при воздействии частиц космического мусора // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. Т. 16. № 5. С. 53-58.
- 37 Панасюк М.И., Новиков Л.С. Модель космоса. Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007

- 38 В.А. Крисилов, С.М. Побережник, Р.А. Тарасенко Сравнительный анализ моделей представления знаний в интеллектуальных системах  
[http://storage.library.opu.ua/online/periodic/opu\\_1998\\_2\(6\)/1\\_14.htm](http://storage.library.opu.ua/online/periodic/opu_1998_2(6)/1_14.htm)
- 39 В.С. Абриков, С.В. Абриков, А.В. Смирнов, Е.В. Карлович Методы интеллектуального анализа данных при создании баз знаний// Информатика, вычислительная техника и управление, Вестник Чувашского университета, 2015. № 1
- 40 Существующие способы построения баз экспертных знаний  
[http://oplib.ru/psihologiya/view/839218\\_sposoby\\_postroeniya\\_baz\\_ekspertnyh\\_znaniy](http://oplib.ru/psihologiya/view/839218_sposoby_postroeniya_baz_ekspertnyh_znaniy)
- 41 Э.А. Бабкин О.Р. Козырев И.В. Куркина Принципы и алгоритмы искусственного интеллекта Нижний Новгород 2006
- 42 Журавлева Л. В., Стригулин К. А. Исследования особенностей развития нейронных сетей в современном мире [Текст] // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2016 г.). — СПб.: Свое издательство, 2016. — С. 9-11. — URL <https://moluch.ru/conf/tech/archive/166/10748/>
- 43 Минский, М., Пейперт, С. Перцептроны = Perceptrons. — М.: Мир, 1971. — 261 с
- 44 Горбань А. Н., Россиев Д. А., Нейронные сети на персональном компьютере. — Новосибирск: Наука, 1996. — 276 с
- 45 Митюшкин Ю.И., Мокин Б.И., Ротштейн А.П. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний. УНИВЕРСУМ-Винница, 2002.]:
46. Вудс У.А. Основные проблемы представления знаний // ТИИЭР. - 1986. - Т. 74. - № 10. - С. 32 - 47
- 47 Уотермен Д. Руководство по экспертным системам: Пер. с англ. - М.: Мир, 1989.
- 48 Экспертные системы. Принципы работы и примеры: Пер. с англ. / Под ред. Р. Форсайта. - М.: Радио и связь, 1987

- 49 Элти Дж., Кумбс М. Экспертные системы: Концепции и примеры. - Пер. с англ. - М.: Финансы и статистика, 1986.
- 50 Hammond P. Logic programming for expert systems // M. Sc. Thesis. Dept. of Computing. Imperial College, Univ of London, England, 1980]
- 51 McCulloch W.S., Pitts W.H. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // Bull. Math. Biophys. - 1943. - V. 5. - P. 115 - 133.
- 52 Rosenblatt F. Principles of neurodynamics. - Spartan., Washington, D.C., 1962.
53. Carpenter G.A., Grossberg S. A massively parallel architecture for a self-organizing neural pattern recognition machine // Comput. Vision Graphics Image Process. - 1986. - V. 37. - P. 54 - 115]
- 54 Тэнк Д.У., Хопфилд Д.Д. Коллективные вычисления в нейроноподобных электронных схемах // В мире науки. - 1988. - № 2. - С. 44 - 53.9
- 55 Шевченко В. Нейронные сети // Компьютерное обозрение. - № 46. - 1996. - С. 19
56. Скрэгг Г. Семантические сети как модели памяти // Новое в зарубежной лингвистике. - М.: Радуга, 1983. - Вып. 12. - С. 228
- 57 Минский М. Фреймы для представления знаний. - М.: Мир, 1979.
- 58 Шлеер С., Меллор С. Объектно-ориентированный анализ: моделирование мира в состояниях. - Пер. с англ. - К.: Диалектика, 1993.].
- 59 ГОСТ 27.002-89 "Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения"
- 60 Баранчеев, В. П. Управление знаниями в инновационной сфере [Электронный ресурс]: учебник / В. П. Баранчеев. - Магадан : Благовест-В, 2007. - 271 с.
- 61 Джозеф Джарратано, Гари Райли. Глава 2. Представление знаний (в PDF) // Экспертные системы: принципы разработки и программирование Expert Systems: Principles and Programming. — 4-е

изд. — М.: «Вильямс», 2006. — С. 1152.

- 62 Представление и использование знаний: Пер. с япон. / Под ред. Х.Уэно, М.Исидзука. — М.: Мир, 1989. С. 9-28.
- 63 Попов Э.В. и др. Искусственный интеллект. — В 3-х кн. Кн. 2. Модели и методы. — М.: Радио и связь, 1990. С. 7-13.
- 64 Ротшейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети. Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. 320 с.
- 65 Обучение нейронных сетей /А. Н. Горбань. — М.: СП "ПараГраф", 1990. - 159 с.
- 66 Zimmermann H.-J. Fuzzy Set Theory - and Its Applications.- Kluwer: Dordrecht.-1991.-315 p.
- 67 Л. А. Заде, “Нечеткие множества”, Нечеткие системы и мягкие вычисления, 10:1 (2015), 7–22; Information and Control, 8:3 (1965), 338–353.
- 68 Круглов В.В. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода/ В.В. Круглов, М.И. Дли. - М.: Физматлит, 2002. -198 с.
- 69 Еремеев А. П. О корректности продукционной модели принятия решений на основе таблиц решения, Автомат. и телемех., 2001, № 10, 78–90; Autom. Remote Control, 62:10 (2001), 1608–1619.
- 70 Еремеев А.П. Продукционная модель представления знаний на базе языка таблиц решений // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1987. N 2. - С. 196-207.
- 72 Петров А.Е. Тензорный метод двойственных сетей. — М.: ООО ЦИТВП, 2007. — 496 с.
- 73 Крон Г. Исследование сложных систем по частям — диакоптика. — М.: Наука, 1972. — 544 с.
- 74 С. Николенко, А. Кадурич, Е. Архангельская, Глубокое обучение. — СПб.: Питер, 2018. — 480 с.: ил. — (Серия «Библиотека

- программиста»).
- 75 Саати Т. Математические модели конфликтных ситуаций. - М.: Сов. радио.-1977.-304 с.
  - 76 Ротшейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети. Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. 320 с.
  - 77 Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем [Текст]: (Эффективность и надежность) / В.И. Нечипоренко. - Москва: Сов. радио, 1977. - 214 с.
  - 78 Саати Т.Л. Математические модели конфликтных ситуаций. Издательство: -М., Советское радио 1997, 195 с.
  - 79 А.В. Лотов, И.И. Поспелова Многокритериальные задачи принятия решений, Москва, 2008.
  - 80 Митюшкин Ю.И., Мокин Б.И., Ротштейн А.П. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний. УНИВЕРСУМ-Винница, 2002.
  - 81 Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. - М., 1976. - с. 172-215.
  - 82 Мухаметзянов И.З. Нечеткий логический вывод и нечеткий метод анализа иерархий в системах поддержки принятия решений: приложение к оценке надежности технических систем //Кибернетика и программирование. 2, 2017, -с. 59-77. DOI:10.7256/2306-4196.2017.2.21794.
  - 83 Нечеткие множества и нейронные сети Г.Э. Яхьяеваю— М.: Национальный открытый институт «ИНТУИТ», 2016 (основы информационных технологий).
  - 84 Paliukh B.V., Kemaikin V.K., Kozlova Yu. G. Development principles of knowledge database of intelligent system for estimation of dynamical interaction of orbital systems with space debris// IT in industry, vol 6, № 2

- (2018), pp. 1-6, Web of Science. <http://it-in-industry.com/issue/archive/67.html>.
- 85 Paliukh B.V., Kemaykin V.K., Kozlova Y.G., Kozhukhin I.V. Forecasting of Results of Dynamic Interaction Between Space Debris and Spacecrafts on the Basis of Soft Computing Methods. In: Abraham A., Kovalev S., Tarassov V., Snasel V., Sukhanov A. (eds) Proceedings of the Third International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI'18). ITI'18 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 874. Springer, Cham.
- 86 Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. -М.:Мир.- 1976.-167 с
- 87 Быстрый холод вдохновенья - ИВАНОВ С. М. Москва "Советская Россия" 1988 г. ISBN 5-268-00396-8.
- 88 С.Д. Штовба Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику/ Интернет учебник <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>.
- 89 Обучение нейронных сетей /А. Н. Горбань. — М.: СП "ПараГраф", 1990. - 159 с.
- 90 Подиновский В. В. Парето – оптимальные решения многокритериальных задач Серия: Сер. "Анализ и поддержка решений" Издательство: Физматлит, 2007 г.
- 91 Кожухин И.В., Кемайкин В.К. Формирование барьера безопасности на космическом аппарате при угрозе воздействия космического мусора методами нечеткой логики// Программные продукты и системы / Software&Systems 1 (32) 2019, с.124-129.
- 92 Грибовский С. В., Сивец С. А., Левыкина И. А. Математические методы оценки стоимости имущества. М.: Маросейка : Книжная Линия, 2014.
- 93 В. И. Куренков, В. А. Капитонов Методы обеспечения надёжности и экспериментальная отработка ракетно-космической техники//



Электронное учебное пособие, Самара, 2012.

- 94 Orphal D.L., Frazen R.R., Piekutovski A.J., Forrestal M.J. Penetration of confiden aluminum nitride targets by tungsten long rods at 1.5 to 4.5 km/s // Int. J. Impact Engng. 1996. No. 10. pp. 335-368.
- 95 Subramanian R., Bless S.J. Penetration of semi-infinite AD995 alumina targets by tungsten long rods penetrators from 1.5 to 3.5 km/s // Int. J. Impact Engng. 1995. No. 17. pp. 807-816.
- 96 Grase F.I., Rupert N.L. Mechanisms for ceramic/metal, bi-elements targets response to ballistic impact // Mechanisms for ceramic/metal, bi-elements targets response to ballistic impact. Canado. 1993. Vol. 2. pp. 361-370.
- 97 Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Хабибуллин М.В. Прогнозирование последствий высокоскоростного соударения метеоритных частиц с элементами защитных конструкций космических аппаратов // Космические исследования. 1997. Т. 35. № 5.

### Методика и программа экспериментальных исследований

Объектом экспериментальных исследований являются физические модели конструкции корпуса космического аппарата из перспективных материалов.

Целью экспериментальных исследований являются оценка параметров процесса ударного воздействия осколочных элементов (ОЭ) при пробитии конструкции корпуса и жизненно-важных агрегатов КА.

Данная методика разработана на основе научно-методического аппарата проведения экспериментальных исследований уязвимости летательных аппаратов к действию поражающих элементов НИЦ (г.Тверь) ЦНИИ ВВКО Минобороны России.

Комплексный баллистический стенд при исследованиях макетных мишеней включает:

- метательную установку и выстрелы к ней;
- систему закачки водорода высокого давления;
- контрольно-измерительную аппаратуру;
- систему рамочного измерения скорости и формы мишени снаряда;
- систему измерения скорости снаряда на участках внутренней и внешней баллистик;
- трассово-щитовую систему регистрации движения снаряда;
- камеру съемки объекта во время испытаний;
- систему безопасности проведения исследований в соответствии с инструкциями и «Технологической картой при работе на ТП 2 СМК» «ЦНИИ ВВКО» Минобороны России.

Сроки проведения экспериментальных исследований август – сентябрь 2018 г.

При проведении экспериментальных исследований оцениваются характеристики и расчетные соотношения процесса высокоскоростного ударного воздействия ОЭ.

К задаваемым параметрам относятся:

- характерный размер и масса ОЭ;
- материал и толщина преград;
- расстояния между преградами;
- угол встречи ОЭ с преградой от нормали;
- расстояния между датчиками скорости.

К определяемым характеристикам относятся:

- скорость воздействия ОЭ;
- скорость ОЭ после пробития преграды;
- масса и характерный размер ОЭ после пробития преграды;
- угол разлета вторичного потока осколков после пробития преграды;
- координаты и параметры характерных разрушений в преградах после их пробития;
- масса вторичного поля.

Перед началом экспериментальных исследований определяются:

- задачи, особенности и порядок проведения экспериментальных исследований;
- необходимое материально-техническое обеспечение;
- объем регистрируемой информации;
- мероприятия по технике безопасности.

Испытания проводятся в условиях окружающей среды, соответствующей условиям испытательного бокса.

При подготовке и проведении эксперимента необходимо руководствоваться настоящей методикой, ТЗ и эксплуатационной документацией на средства измерений и стендовое оборудование. Разнесенные преграды или комплектующие элементы, поступающие на эксперимент, должны пройти входной контроль. Сборка моделей агрегатов и узлов производится на сборочном стапеле. Во время эксперимента процесс ударного взаимодействия регистрируется с помощью рентгеноимпульсной установки.

При проведении эксперимента необходимо пользоваться общими правилами и инструкциями по технике безопасности, согласованными и утвержденными в установленном порядке.

Условием прекращения экспериментальных исследований являются:

- неисправность физических моделей, препятствующая дальнейшему проведению экспериментальных исследований;
- отказ баллистической установки (БУ), препятствующий дальнейшему проведению экспериментальных исследований.

Схема проведения экспериментов представлена на рисунке П1.1.

Исследуемые преграды (3) устанавливаются на маятниковых импульсомерах (5) и закрепляются на стенде. Высокоскоростное воздействие осуществляется с помощью пороховых и легкогазовых баллистических установок (1), способных обеспечить метание одиночных ОЭ с различными скоростями в интервале  $V_0 \approx 300 - 4200$  м/с. и массами в диапазоне  $m_0 = 0,5 - 150$  г.

Подкалиберное метание с использованием специальных разрезных поддонов позволяет реализовать требуемые условия высокоскоростного взаимодействия ОЭ с неподвижными объектами исследования (мишенями 1, 2, 3...n-1). Скорость ОЭ измеряется контактным методом с помощью плоских датчиков (4) и измерителей времени (6). Импульс, воспринимаемый преградой, определяется с помощью датчика (2) на основании измерения угла отклонения импульсомера. Суммарная масса вторичного потока осколков определяется как дефицит массы преграды после эксперимента. Для оценки параметров вторичного потока используется также рентгеноимпульсная установка (7). Количество и номера преград, устанавливаемых на импульсомерах, определяются исходя из условий и задач эксперимента.

После эксперимента проводится дефектация моделей, которая включает:

- визуальный осмотр, фотографирование разнесенных преград и их узлов на стенде;
- разборку моделей на основные комплектующие элементы и их дефектация;
- замер разрушений и оценка "портрета" запреградного поля осколков на каждой преграде;
- оформление отчетной документации по результатам дефектации.

Фотографии выполняются в цветном изображении.

Метрологическое обеспечение измерений производится в соответствии с ГОСТ РВ8.570-98. Средства измерений, применяемые для измерений, должны иметь сертификаты в соответствии с ГОСТ РВ8.560.95 и действующие свидетельства о поверке.

В результате проведения экспериментальных исследований должны быть получены зависимости параметров разрушения моделей от начальных условий воздействия ОЭ.

### **Программа экспериментальных исследований**

Объектом испытаний являются экспериментальные образцы материалов, их пакетов и моделей элементов конструкции КА. Выстрелы изготавливаются в количестве, необходимом для выполнения требований ТЗ.

Целью экспериментальных исследований являются оценка параметров процесса ударного воздействия ОЭ при пробитии конструкции корпуса и жизненно-важных агрегатов КА.

В процессе испытаний должны быть решены следующие задачи:

- изучения механизмов и критериев поражения корпуса КА, при воздействии высокоскоростных ОЭ;
- получение исходных данных для формирования модели и методики оценки живучести КА при воздействии высокоскоростных ОЭ.

Основанием для проведения испытаний являются ТЗ на задание №2.1777.2017/ПЧ.

Испытания проводятся на стрельбовом моделирующем комплексе (СМК) ФГБУ «ЦНИИ ВВКО» Минобороны России в период с 1.07. по 20.09. 2018 года.

В исследованиях могут принимать участие представители:

- ФГБОУВО ТвГТУ;
- ФГБУ «ЦНИИ ВВКО» Минобороны России
- других организаций по согласованию с Заказчиком.

Испытания макетных образцов проводятся в объеме 2 - 3 выстрелов в день из расчета 15-20 экспериментов всего. При каждом выстреле определяются следующие характеристики:

- масса воздействующих ОЭ, их скорость и угол воздействия;
- материал преград, их толщина и температура нагрева;
- параметры повреждения макетных образцов;
- параметры запреградного поля (производится при необходимости).

Предварительный объем экспериментальных исследований оценки механического действия ОЭ по физическим моделям элементов конструкции КА представлен в таблице П1.1.

Таблица П1.1 - Объем экспериментальных исследований по оценке параметров разрушения преград при осколочном воздействии.

№ п/п	Материал мишени	Толщина, мм	Масса ОЭ, г	Угол воздействия ОЭ, °	Расстояние до экрана – свидетеля, мм	Скорость метания ОЭ $V_o$ , м/с
1	Д16Т+Д16Т+Д16Т	3+3+3	3,5	90	100	3000
2	Д16Т+Д16Т+Д16Т	3+3+3	8,4	45	100	3000
3	ВТ-14+ВТ-14+ВТ-14	2+2+2	3,5	90	100	3000
4	ВТ-14+ВТ-14+ВТ-14	2+2+2	8,4	90	100	3000
5	Углепл+Д16Т+Д16Т	6+3+3	8,4	90	100 -200	3000
6	Углепл+Д16Т+Д16Т	6+3+3	8,4	90	100 -200	3000

№ п/п	Материал мишени	Толщина, мм	Масса ОЭ, г	Угол воздействия ОЭ, °	Расстояние до экрана – свидетеля, мм	Скорость метания ОЭ $V_o$ , м/с
7	Углепл+ВТ-14+Д16Т	6+2+3	8,4	90	100 -200	3000
8	Углепл+Д16Т+Д16Т	12+3+3	8,4	90	100 -200	3000
9	Углепл+ВТ-14+Д16Т	12+2+3	8,4	90	100 -200	3000
10	Углепл+Д16Т+Д16Т	6+3+3	8,4	90	100 -200	1400
11	Углепл+Д16Т+Д16Т	6+3+3	8,4	90	100 -200	1400
12	Углепл+Д16Т+Д16Т	12+3+3	3,5	90	100 -200	1600
13	Углепл+ВТ-14+ВТ-14	6+2+2	8,4	90	100 -200	1600
14	Углепл+ВТ-14+Д16Т	12+2+3	8,4	90	100 -200	1600
15	Углепл+Д16Т+Д16Т	6+3+3	3,5	90	100 -200	1600

Исследования проводятся в соответствии со структурной схемой макетного образца мишеней и последовательности действий, изложенных в технологической карте при работе на ТП 2 СМК и инструкциях по технике безопасности, действующих в ФГБУ «ЦНИИ ВВКО» Минобороны России.

По результатам измерений проводится обобщение результатов стендовых экспериментальных исследований и уточнение направления дальнейших исследований.

При невозможности проведения экспериментальных исследований по причине отказа оборудования или отсутствия материально-технического обеспечения объявляется перерыв, который оформляется протоколом, подписанным членами специальной комиссии. В протоколе указывается причина перерыва и его продолжительность.

На ФГБОУВО ТвГТУ возлагается:

- разработка программы и методики проведения экспериментальных исследований;

- изготовление образцов снарядов;
- обработка и анализ результатов экспериментальных исследований;
- оформление протокола экспериментальных исследований и его согласование.

- общая организация и проведение экспериментальных исследований совместно с ФГБУ «ЦНИИ ВВКО» Минобороны России.

На ФГБУ «ЦНИИ ВВКО» Минобороны России возлагается:

- оборудование и подготовка мишенной позиции СМК;
- подготовка к экспериментальным исследованиям БУ и производство выстрелов;

- проведение экспериментальных исследований совместно с ФГБОУ ВО ТвГТУ.

**Требования безопасности при подготовке и проведении испытаний:**

- руководителю работ ознакомить персонал, участвующий в испытаниях, с порядком проведения работ и с мероприятиями по безопасному их выполнению;

- при необходимости установить аварийную сигнализацию;

- проверить отсутствие внутри и снаружи оборудования посторонних предметов;

- определить места и условия безопасного пребывания лиц, занятых испытанием.

Во время проведения испытаний руководитель работ обязан:

- подать сигнал сирены на укрытие личного состава;

- проверить выполнение команды на укрытие личного состава всех лиц участвующих в испытаниях;

- подать команду на зарядание БУ;

- получить доклад о готовности регистрирующей аппаратуры;

- произвести выстрел;

- подать команду на разряжение БУ;



- подать сигнал сирены на выход личного состава из укрытия.

Метрологическое обеспечение измерений в соответствии с ГОСТ РВ8.570-98. Средства измерений, применяемые для измерений, должны иметь сертификаты в соответствии с ГОСТ РВ8.560.95 и действующие свидетельства о поверке.

К числу отчетных документов относятся акт и протоколы испытаний, акт технического состояния опытного образца после испытаний и другие материалы испытаний, акт на списание материальной части (при необходимости).

### **Проведение экспериментальных исследований динамического взаимодействия ОЭ с перспективными материалами**

В процессе экспериментальных исследований проводятся оценки параметров:

- разрушения физических моделей конструкции корпуса и жизненно-важных агрегатов КА при их пробитии;
- процесса динамического взаимодействия объектов (поражающих элементов) с перспективными конструкционными материалами.

Экспериментально исследуется поражающее действие ОЭ в диапазоне значений скорости соударения 500–3500 м/с.

В соответствии с разработанной программой и методиками проведения экспериментов при проведении испытаний в качестве исследуемых материалов выбраны три основных авиационно-космических конструкционных материала:

- алюминиевый сплав Д16-Т (ГОСТ4784-74);
- титановый сплав ВТ 14 (ГОСТ 22178-76);
- углепластик на основе углеткани УТ-900-2,5.

Данные материалы рассматриваются как основные конструкционные материалы при создании космических конструкций.

Физико-механические свойства материалов приведены в таблице П1.2.

Таблица П1.2 – Физико-механические характеристики преград

№	Наименование материала	Плотность материала, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Твердость по Бринеллю, НВ	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности на растяжение, $\sigma_b$ , МПа	Предел прочности на срез, $\tau_{ср}$ , МПа	Модуль Юнга, $E$ , ГПа	Объемный модуль, $K$ , ГПа
1	Сплав ВТ 14	4,45	255-341	850	950	570	120	118
2	Сплав Д16-Т	2,80	115	334	468	328	72	71
3	Углепластик	1,54	–	–	500	240	65	–

Экспериментальные исследования были проведены на позициях СМК ФГБУ «ЦНИИ ВВКО» Минобороны России.

В качестве БУ выбраны:

-легкогазовая установка ГУ-23, обеспечивающая высокоскоростное метание ОЭ массой от 0,5 до 50 граммов со скоростями от ~2000 до ~4000 м/с;

-пороховая установка ВЯ-23, обеспечивающая высокоскоростное метание ОЭ массой от 0,5 до 100 граммов со скоростями от ~200 до ~1800 м/с.

Основываясь на программе экспериментальных исследований по стрельбовым испытаниям образцов материалов под воздействием антропогенных частиц, проведены закупки материалов и покупных изделий, перечень и количество которых представлено в таблице 1.3.

Для изготовления мишеней и макетов ЖВА КА приобретены необходимые конструкционные материалы п.п. 1, 3, 12, 13, таблица П1.3.

Для измерения скорости и времени проникания ОЭ при пробитии набора разнесенных преград, изготовлены контактные датчики п. 2, таблица П1.3.

Для метания высокоскоростных ОЭ с заданными массогабаритными характеристиками и скоростями изготовлен ствол к баллистической

установке ГУ-23 п. 14 и метаемые сборки п. 7, таблица П1.3, представляющие собой разрезные поддоны с ОЭ, расположенными внутри них в специально выфрезерованных полостях.

Кроме того, приобретены необходимые для проведения экспериментов расходные материалы: провода, буфера, пушсмазка, водород и др. п.п. 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, таблица П1.3.

Таблица П1.3 - Материалы и покупные изделия, необходимые для изготовления средств материально-технического обеспечения экспериментов

№ п/п	Наименование материалов, сырья, покупных полуфабрикатов, готовых изделий	Ед. изм.	Кол-во
1	Композитный материал с использованием предварительно пропитанной двунаправленной графитовой оболочки (12мм) на основе углеткани УТ-900-2,5.	кг.	10
2	Датчик контактный измерения параметров БПП	шт.	40
3	Лист (Д16-Т) 3000*1200*3 мм,	шт.	1
4	Провод ПВС 1х2+1	м.	200
5	Провод П-274М	м.	200
6	Буфер ГУ-23	шт.	20
7	Метаемая сборка с поражающим элементом	шт.	20
8	ЦИАТИМ 201 (пушсало)	кг.	6
9	Водород газ марки А	бал.	5
10	Перчатки миткалевые	шт.	10
11	Поршень БУ ГУ-23	шт.	1
12	Титан ВТ 14 (листовой)	кг.	10
13	Макет ГЧ космического аппарата	шт.	1
14	Труба к баллистической установке ГУ-23	шт.	1

Программа проведения экспериментальных исследований направлена на получение экспериментальных данных об оценке стойкости и живучести поврежденных силовых элементов КА при осколочном воздействии в условиях теплосилового нагружения конструкции элемента КА при полете в интересах уточнения настроек оценки живучести и эффективности КА.

На основании полученных результатов испытаний создана модель расчета остаточной прочности поврежденных элементов КА и методика расчета потери прочности элементов при осколочном воздействии в условиях теплосилового нагружения на траектории гиперзвукового полета.

Исследование процесса пробития разнесенных преград высокоскоростным компактным ОЭ предполагает установление количественных соотношений между исходными параметрами, влияющими на процесс пробития и разрушения преград (физико-механические свойства ОЭ и преград, начальная скорость, масса и углы встречи ОЭ с преградами, схема расположения преград и т.д.), и искомыми результатами воздействия ОЭ по преградам (суммарная толщина пробиваемых преград, размеры разрушений в преградах, запреградные характеристики первичного и вторичного потоков осколков и т.д.).

Стрельбовые испытания применительно к рассматриваемому в ТЗ диапазону условий воздействия ОЭ по экспериментальным образцам позволяют на основе результатов стрельб определить графические или аналитические зависимости, устанавливающие функциональную связь полученных результатов с исходными параметрами. Такие зависимости просты и достаточно надежны и, кроме того, наглядно показывают влияние каждого исходного параметра на процесс пробития и разрушения экспериментальных образцов. Тип и марка ЭО согласовываются с заказчиком на каждом этапе работы.

Для проведения стрельбовых испытаний по оценке параметров процесса взаимодействия ОЭ с системой разнесенных преград используется экспериментальная установка, схема ее представлена на рисунке П1.1. Описание мишенной обстановки представлено в разделе 1.1.1. Для оценки параметров вторичного потока используется также рентгеноимпульсная установка (7). Количество и номера преград, устанавливаемых на импульсомерах, определяются исходя из условий и задач эксперимента.

В экспериментах варьировались:

- масса воздействующих ПЭ, их скорость и угол воздействия;
- материал преград, их толщина.

После эксперимента на каждой преграде производится замер разрушений и оценка "портрета" запреградного поля осколков.

На рисунке П1.2 представлена мишенная обстановка перед проведением эксперимента №4. На преграды наклеены датчики для определения временных параметров эксперимента. На рисунке П1.3 представлена мишенная обстановка после проведения эксперимента.

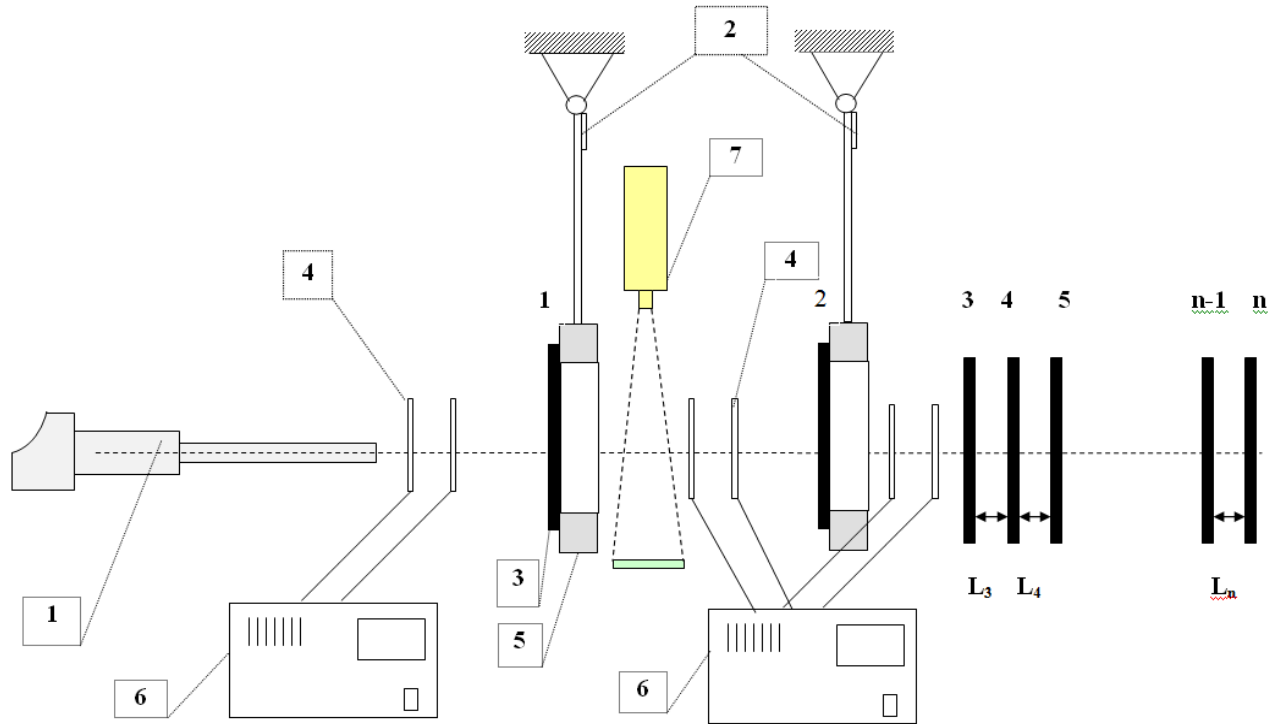


Рисунок П1.1 - Схема экспериментальной установки для оценки параметров процесса взаимодействия ОЭ с системой разнесенных преград



Рисунок П1.2 - Мишенная обстановка перед проведением эксперимента



Рисунок П1.3 - Мишенная обстановка после проведения эксперимента №7

В результате проведения экспериментальных исследований получены зависимости параметров разрушения моделей КА от начальных условий воздействия ОЭ.

### **Анализ результатов экспериментальных исследований динамического взаимодействия тел с перспективными материалами**

По результатам проведенных экспериментов было осуществлено наполнение базы данных, содержащей условия проведения каждого эксперимента, полученные в них экспериментальные оценки и фотографии мишеней до и после эксперимента.

В первой части стендовых экспериментальных исследований оценивались параметры повреждения конструкционных материалов алюминиевого сплава Д16-Т и титанового сплава ВТ 14 (эксперименты №1 - 4);

Во второй части экспериментальных исследований (эксперименты №5 - 15) оценивались параметры повреждения пакетов и моделей элементов конструкции КА по оценке стойкости к осколочному воздействию. В качестве моделей использовались двухслойные пакеты, в которых первый

слой был композитный материал углепластик на основе углеткани УТ-900-2,5 и эпоксидного связующего толщиной 6 и 12мм. В качестве второго слоя использовались:

- титановый сплав ВТ-14(ГОСТ 22178-76) толщиной 2 мм;
- дюральД16-Т (ГОСТ4784-74) толщиной 3 мм.

На основании полученных результатов испытаний:

- оценены параметры повреждения как одиночных преград из конструкционных материалов, так и двухслойных пакетов, моделирующих элементы конструкции современных КА;

- найдены количественных соотношений между исходными параметрами, влияющими на процесс пробития и разрушения преград и искомыми результатами воздействия ОЭ по преградам;

- оценены суммарная толщина пробиваемых преград, размеры разрушений в преградах, запреградные характеристики первичного и вторичного потоков осколков и энергетические параметры процесса пробития пакетов преград;

- создана база данных для расчета остаточной прочности поврежденных силовых элементов конструкции современных КА.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить для соударяющихся пар ОЭ (ШХ-15) и исследуемых преград аналитический вид зависимостей:

$$D_{n1} = f(m_o, V_o, \rho_o, \rho_{M1}, h_1, K_\phi);$$

$$V_{z1} = f(m_o, V_o, \rho_o, \rho_{M1}, h_1, K_\phi);$$

$$P_1 = f(m_o, V_o, \rho_o, \rho_{M1}, h_1, K_\phi);$$

$$\Delta E_1 = f(m_o, V_o, \rho_o, \rho_{M1}, h_1, K_\phi).$$

где:  $D_{n1}$  - диаметр отверстия (характерный размер повреждения) в преградах;  $V_{z1}$  - запреградная<sub>1</sub> скорость ОЭ;  $P_1$  - импульс, воспринимаемый преградой при воздействии ОЭ.

Оценка параметра  $\Delta E_I$  (энергия, поглощенная преградой) производится расчетным путем, по измеренным значениям параметров экспериментов, для каждого вида материала преград.

Для оценки повреждаемости преград при пробитии ОЭ основным параметром является характерный размер разрушения  $D_{nI}$ . Анализ экспериментальных данных показывает, что при пробитии преград из сплавов титана Д16-Т и ВТ-14 стальным ОЭ шаровой формы размер пробоины для заданных характеристик материала в значительной степени определяется скоростью удара и относительной толщиной преграды ( $H_m/d_o$ ).

При скорости удара, не превышающей некоторого значения  $V_{nl}$ , соответствующего началу пластических деформаций ОЭ, диаметр пробоины  $D_n$  в преградах приблизительно равен диаметру ОЭ  $d_o$ . С увеличением скорости удара (когда  $V_o > V_{nl}$ ) происходит заметное увеличение размеров пробоины.

На рисунке П1.4 представлены зависимости относительных диаметров пробоины в преградах из сплава ВТ-14,  $h_m = 2.0$  мм, от скорости соударения со стальными компактными ОЭ массой 3,5г и 8,4 г.

Еще большее значение имеет угол воздействия ОЭ. На рисунке П1.5 представлены зависимости относительных масс выбитой пробоины преград из сплава ВТ-14,  $h_m = 2.0$  мм, при воздействии стальным ОЭ шаровой формы под различными углами. Из рисунка П1.5 видно, что уменьшение угла воздействия ОЭ приводит к резкому увеличению выбитой массы преграды и характерных размеров повреждений.

Экспериментальные исследования по оценке стойкости к осколочному воздействию двухслойных преград в качестве моделей элементов конструкции КА показали, что в такой конструкции наблюдается более значительное повреждение второй преграды. На рисунках П1.6 (а, б) представлены результаты воздействия ОЭ в эксперименте № 6. Условия воздействия ОЭ представлены в таблице 6 (Приложения 2).



Основываясь на анализе данных проведенных стендовых экспериментальных исследований и определения значимых факторов, а также накопленного опыта исследований по данной тематике [92, 93, 94, 95], следует отметить, что сплав ВТ-14 остается одним из самых перспективных конструкционных материалов для КА. Учитывая его преимущества по удельному весу, жаростойкости и стойкости к осколочному воздействию.

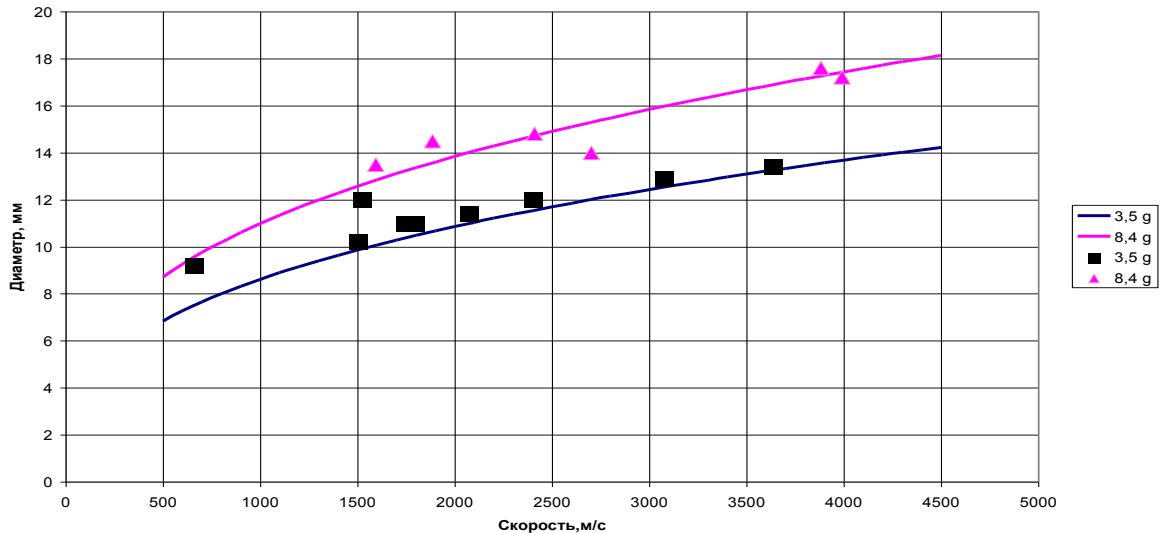


Рисунок П1.4 – Зависимость относительных диаметров пробойны в преградах из сплава ВТ-14,  $h_m = 2.0$  мм, от скорости соударения со стальным компактным ОЭ массой 3,5 г и 8,4 г.

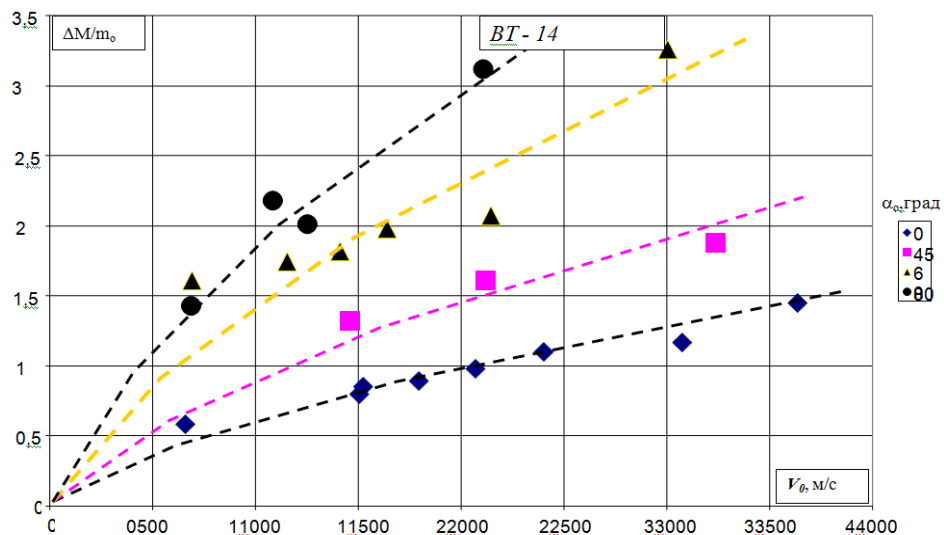


Рисунок П1.5 – Зависимость  $\Delta M/m_0$  для преград из сплава ВТ-14,  $h_m = 2.0$  мм, при воздействии стальным ОЭ шаровой формы под различными углами.



а)

б)

Рисунок П1.6 - Результаты эксперимента № 6: образец (углепл+Д16Т+Д16Т):

а - лицевая сторона преграды 2, б - тыльная сторона преграды 2.















































## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Кожухина Игоря Валерьевича на тему «Методы и алгоритмы построения базы знаний системы защиты оптико-электронной аппаратуры от антропогенных частиц»

Комиссия в составе начальника отдела «Исследований радиооптических информационных систем наземно-воздушно-космического базирования» Павлова В.А., заместителя начальника отдела начальника Белова А.А., начальника 1 сектора Ковальчука А.Н. составила настоящий акт в том, что материалы диссертационной работы Кожухина И.В. на тему «Методы и алгоритмы построения базы знаний системы защиты оптико-электронной аппаратуры от антропогенных частиц» использованы при выполнении НИР «Модели и методика для прогнозирования условий и результатов воздействия космического мусора на космический аппарат с использованием теории нечётких множеств и искусственных нейронных сетей» (инв. №445) и внедрены в научно-производственный процесс АО «РТИС ВКО», в части:

1. Алгоритма прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц.
2. Алгоритма обучения базы знаний комплексной интеллектуальной системы защиты (БЗ КИСЗ) прогнозированию условий и результатов воздействия антропогенных частиц.
3. Алгоритма оценки эффективности и выбора барьера безопасности космического аппарата от воздействия антропогенных частиц.
4. Методики построения БЗ КИСЗ от антропогенных частиц.
5. Программного комплекса, реализующего информационную модель обеспечения безопасности КА и перечисленные алгоритмы.

Начальник отдела, к.в.н., доцент

В.А. Павлов

Заместитель начальника отдела, к.т.н.

А.А. Белов

Начальник сектора, к.в.н., профессор

А.Н. Ковальчук

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019613652

«Программно-методический комплекс оценки цифровых  
оптико-электронных систем с использованием функции  
передачи модуляции»

Правообладатели: *Молчанов Андрей Сергеевич (RU), Николаев Сергей  
Владимирович (RU), Журавель Владимир Иванович (RU), Чаусов  
Евгений Викторович (RU), Кожухин Игорь Валерьевич (RU)*

Авторы: *Молчанов Андрей Сергеевич (RU), Николаев Сергей  
Владимирович (RU), Журавель Владимир Иванович (RU), Чаусов  
Евгений Викторович (RU), Кожухин Игорь Валерьевич (RU)*

Заявка № 2019612392


Дата поступления 11 марта 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 20 марта 2019 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев