

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Тонков Юрий Леонидович

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ  
КАТЕГОРИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Кашеварова Галина Геннадьевна

Пермь – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                                                                                                            | 5  |
| 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К<br>ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ<br>КОНСТРУКЦИЙ И СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АВТОМАТИЗАЦИИ<br>ПРОЦЕССА ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ..... | 12 |
| 1.1 Основные положения диагностики технического состояния<br>конструкций зданий и сооружений .....                                                                                                       | 12 |
| 1.2 Проблемы назначения категории технического состояния<br>конструкций зданий и сооружений и возможные пути их решения .....                                                                            | 15 |
| 1.3 Современные методы, модели и технологии в представлении знаний<br>(Исследование подходов к моделированию представления знаний) .....                                                                 | 21 |
| 1.3.1 Вероятностные методы.....                                                                                                                                                                          | 21 |
| 1.3.2 «Искусственный интеллект» или «разумные решения и логические<br>рассуждения» .....                                                                                                                 | 22 |
| 1.3.3 Экспертные системы.....                                                                                                                                                                            | 26 |
| 1.4 Обзор исследований по применению технологий искусственного<br>интеллекта в строительной отрасли .....                                                                                                | 31 |
| 1.5 Структурная модель перспективной комплексной интеллектуальной<br>системы обследования строительных объектов.....                                                                                     | 39 |
| 1.6 Выводы по главе 1 .....                                                                                                                                                                              | 40 |
| 2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЕКЛАРАТИВНЫХ ЗНАНИЙ<br>ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С<br>ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОНТОЛОГИЙ .....                                                                          | 42 |
| 2.1 Обоснование актуальности онтологического анализа для оценки<br>технического состояния для конструкций эксплуатируемых зданий и<br>сооружений .....                                                   | 43 |
| 2.2 Разработка концептуальной модели предметной области «Техническая<br>диагностика строительных конструкций» .....                                                                                      | 47 |

|                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2.1 Предварительный системный анализ знаний о техническом состоянии конструкции .....                                                                                        | 48  |
| 2.2.2 Онтология категориального уровня (ОКУ).....                                                                                                                              | 50  |
| 2.2.3 Индексация онтографа.....                                                                                                                                                | 52  |
| 2.3 Разработка онтологии технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций.....                                                                                     | 53  |
| 2.3.1 Выбор концептов 1-уровня ОКУ.....                                                                                                                                        | 56  |
| 2.3.2 Выбор концептов 2-уровня ОКУ.....                                                                                                                                        | 60  |
| 2.3.3 Выбор концептов 3-уровня ОКУ.....                                                                                                                                        | 61  |
| 2.4 Выводы по главе 2.....                                                                                                                                                     | 78  |
| 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ.....                | 80  |
| 3.1.1 Нечеткая логика в оценке технического состояния строительных конструкций .....                                                                                           | 83  |
| 3.1.2 Математические модели формализации знаний экспертной информации в функциях принадлежности.....                                                                           | 88  |
| 3.2 Разработка методики формализации входных количественных и качественных контролируемых параметров технического состояния строительных конструкций .....                     | 93  |
| 3.2.1 Построение функций принадлежности термов количественных контролируемых параметров технического состояния конструкций.....                                                | 93  |
| 3.2.2 Построение функций принадлежности термов качественных контролируемых параметров технического состояния конструкций.....                                                  | 98  |
| 3.3 Структура математической модели для идентификации категории технического состояния строительных конструкций с применением теории нечетких множеств и нечеткой логики ..... | 113 |
| 3.4 Выводы по главе 3.....                                                                                                                                                     | 125 |

|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ<br>ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ<br>ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКСПЕРТНОЙ<br>СИСТЕМОЙ..... | 127 |
| 4.1 Обоснование применения инструмента реализации математической<br>модели.....                                                                                   | 127 |
| 4.2 Описание программы для идентификации категории технического<br>состояния железобетонной изгибаемой конструкции.....                                           | 129 |
| 4.3 Выводы по главе 4 .....                                                                                                                                       | 147 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                                                  | 149 |
| Список литературы .....                                                                                                                                           | 151 |
| Приложение А Фрагменты онтографа «Техническое состояние<br>железобетонной изгибаемой конструкции» .....                                                           | 168 |
| Приложение Б Примеры описания лингвистических переменных<br>подсистемы «Состояние нормальных сечений» .....                                                       | 176 |
| Приложение В Примеры баз знаний (качественного описания<br>управляющих правил).....                                                                               | 185 |
| Приложение Г Фрагменты материалов, идентифицирующих программу<br>«КТС-ИЖБК» .....                                                                                 | 186 |
| Приложение Д Свидетельство о государственной регистрации программы<br>для ЭВМ .....                                                                               | 191 |
| Приложение Е Акт о внедрении (использовании) результатов<br>кандидатской диссертационной работы .....                                                             | 192 |
| Приложение Ж Примеры численных значений контролируемых<br>параметров, введенных в экспертную систему «КТС-ИЖБК» при апробации....                                 | 193 |
| Приложение З Схемы расположения контролируемых параметров балок<br>Б6, Б7, Б12 .....                                                                              | 206 |



## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** При эксплуатации любой сложной технической системы, в том числе строительного объекта, требуется регулярная диагностика состояния для исключения негативных последствий. Зачастую решения по результатам технического контроля приходится принимать в короткий период времени в условиях неопределенности или противоречивости. Эти решения основываются на экспертных оценках, т.е. на мнениях специалистов, их профессиональном опыте. Для эффективного решения этой проблемы, расширения профессиональных возможностей специалистов целесообразна автоматизация процесса выработки и принятия решений в сложных предметных областях с использованием современных вычислительных технологий и математического моделирования.

Численные методы реализации моделей принятия решений на основе теории нечетких множеств и нечеткой логики позволяют решать неклассические задачи, характеризующиеся нестандартностью, противоречивостью, плохой формализуемостью. Поэтому, несомненно, актуальна разработка нечетких экспертных систем и для такой сложной практической деятельности, как обследование и мониторинг конструкций зданий и сооружений.

Экспертные системы функционируют совместно с человеком. Оптимально формализованные в них знания позволяют пользователю вырабатывать максимально объективные решения. Работа экспертных систем не зависит от настроения и ряда других субъективных факторов, присущих человеку.

Главным критерием в принятии решения о степени аварийности обследуемого строительного объекта является *категория* технического состояния (*нормативное, работоспособное, ограниченно работоспособное или аварийное*). Этот показатель зависит от большого числа *взаимосвязанных* факторов, его определение требует глубоких знаний в области строительства и в большой степени зависят от опыта эксперта. Статистика аварий строительных объектов показывает, что основные причины кроются не столько в физическом износе

конструкций, сколько в неправильной оперативной оценке их состояния. Реализация в программном обеспечении математических моделей, сосредотачивающих в себе максимально возможное количество эвристических знаний высококвалифицированных специалистов необходима для улучшения качества экспертных заключений. На пути создания экспертных систем также актуальной является разработка математических моделей приобретения множества естественно-языковых экспертных знаний и данных о признаках технического состояния конструкций для компьютерной базы знаний.

**Степень разработанности темы.** Проблемами диагностики и оценки технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений занимались и занимаются многие отечественные и зарубежные ученые: А.Г. Ройтман, К.И. Еремин, В.В. Леденев, В.Т. Гроздов, В.Г. Козачек, Н.В. Нечаев, С.Н. Нотенко, И.С. Гучкин, А.И. Бедов, В.В. Знаменский, В.Ф. Сапрыкин, А.И. Мальганов, В.С. Плевков, А.И. Полищук, А.Н. Добромислов, В.В. Габрусенко, Н.В. Прядко и др. Накопленные знания хранятся на естественном языке. Для автоматизации процесса получения экспертного заключения целесообразно использование технологии искусственного интеллекта (*«artificial-intelligence»* – в переводе с английского языка, означает «разумные решения и логические рассуждения») и экспертных систем, которым посвящены работы Д. Маккарти, Н. Нильсона, Л. Заде, Ф. Хейес-Рота, Д. Уотермана, Ю.И. Нечаева, Д.А. Поспелова, А.Н. Аверкина, Т.А. Гавриловой, А.П. Ротштейна и др. ученых.

Исследования по применению моделей, основанных на искусственном интеллекте (теории вероятностей, теории нечетких множеств, искусственных нейронных сетей и др.) к задачам диагностики конструкций зданий и сооружений проводили В.А. Соколов, С.Д. Штовба, О.Д. Панкевич, Т.Н. Солдатенко, Е.И. Коняева, *V. Balen, Z. Zhao, K. M. Hamdia* и др.

Организацию системы декларативных знаний о техническом состоянии конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений и целевое использование этих знаний в экспертных системах предлагается связать с методикой

построения онтологий. Онтология – термин, заимствованный из философии, обозначает модель, описывающую совокупность понятий и отношений между ними и обеспечивающую их унифицированное и многократное использование разными группами исследователей или пользователей. Исследованиям в области разработки и использования онтологий посвящены работы Т.А. Гавриловой, М.Р. Когаловского, С.М. Смирнова, В.Ф. Тузовского, А.В. Палагина, Н.Г. Петренко, К.С. Малахова, *T. Gruber, N. Guarino* и др.

**Цель работы** – разработка математических моделей для идентификации категории технического состояния строительных конструкций и на их основе – интеллектуальной экспертной системы, работающей в условиях нечетко заданных исходных данных, получаемых при обследовании строительных объектов, и ее программной реализации.

**Задачи исследования:**

1. Анализ существующих математических моделей, используемых для оценки технического состояния строительных конструкций в системе обеспечения безопасности эксплуатируемых зданий и сооружений, и применения технологий искусственного интеллекта в технической диагностике в строительной отрасли; обоснование актуальности разработки новой математической модели для идентификации категорий технического состояния строительных конструкций.

2. Выбор интеллектуального метода и обоснование возможности его использования для принятия рациональных решений при оценке технического состояния строительных конструкций.

3. Разработка информационной модели структуры базы знаний интеллектуальной экспертной системы, определяющей алгоритм оценки технического состояния строительных конструкций.

4. Разработка математических моделей принятия решения для идентификации категорий, формализации экспертных знаний и данных в базы знаний оценки технического состояния строительных конструкций с учетом особенности информации, содержащейся в описании признаков дефектов и

повреждений конструкций.

5. Разработка и программная реализация экспертной системы, использующей математические модели для идентификации категории технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций.

6. Внедрение разработанной экспертной системы для идентификации категории технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций в обследование существующих конструкций.

**Научная новизна работы состоит в следующем:**

1. Разработана методика построения и иерархическая структура организации экспертных знаний для нечеткой экспертной системы оценки технического состояния строительных конструкций массового строительства, включающая информационную универсальность и возможность расширения с помощью онтологического системного анализа.

2. Разработаны математические модели для формализации экспертных данных о признаках технического состояния конструкций (для построения функций принадлежности значений контролируемых параметров к лингвистическим оценкам).

3. Предложена, адаптирована и применена математическая модель нечеткого логического вывода Мамдани в вычислении конкретного (четкого) значения категории технического состояния конструкции.

4. Разработаны алгоритмы и управляющие правила для оперативной оценки технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций массового строительства.

5. Создана и внедрена в практическую деятельность интеллектуальная нечеткая экспертная система «КТС-ИЖБК» для определения категории технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы состоит в разработке математической модели для идентификации категории технического состояния строительных конструкций (на примере железобетонных изгибаемых элементов) по нечетким исходным

данным обследования. Разработанная математическая модель, основанная на аппарате теории нечетких множеств, является универсальной и может быть применена для оценки других видов и типов конструкций из разных материалов с учетом их особенностей.

Практическая значимость заключается в возможности использования разработанных алгоритмов и программ для повышения эффективности, обоснованности и достоверности принятия решения о техническом состоянии оцениваемой строительной конструкции.

Полученные научные и практические результаты работы используются в учебном процессе и научно-исследовательских работах кафедры строительных конструкций и вычислительной механики ПНИПУ, а также при обследовании существующих строительных конструкций на объектах Пермского края.

**Методология и методы исследования.** Теоретическую и методологическую основу исследований составляют положения теории искусственного интеллекта, теории нечетких множеств, теории сооружений, теории надежности, теории железобетона, методы экспертных оценок, методы анализа иерархий.

**Объектом исследования** являются категории технического состояния конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений.

**Предметом исследования** являются методы, модели и алгоритмы оценки технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Структурная модель перспективной комплексной интеллектуальной системы для обследования объектов массового строительства.

2. Методика построения и иерархическая структура организации экспертных знаний экспертной системы, оперирующей нечеткой информацией, для оценки технического состояния строительных конструкций, включающая информационную универсальность и возможность расширения, с помощью онтологического системного анализа.

3. Математическая модель нечеткого логического вывода в вычислении

конкретного (четкого) значения категории технического состояния конструкции.

4. Математические модели для формализации экспертных данных о признаках технического состояния конструкций (для построения функций принадлежности значений контролируемых параметров к лингвистическим оценкам).

5. Результаты внедрения в обследование зданий интеллектуальной нечеткой экспертной системы «КТС-ИЖБК» для определения категории технического состояния железобетонных изгибаемых элементов.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов подтверждается практическим опытом использования теоретических исследований и корректными результатами применения разработанной на их основе экспертной системы (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615097 от 24.04.2018 г.) для оценки технического состояния существующих железобетонных изгибаемых конструкций. Результаты диссертационного исследования внедрены ОАО «Пашийский металлургическо-цементный завод» (г. Пашия, Пермский край) в оценку технического состояния конструкций зданий (подтверждены актом внедрения).

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: III международной научно-практической конференция «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности» (г. Пермь, 2014 г.); VII, VIII и IX Всероссийских молодежных конференциях аспирантов, молодых ученых и студентов «Современные технологии в строительстве. Теория и практика» (г. Пермь, 2015-2017 г.); VI международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (г. Владивосток, 2016 г.); VI международной конференции «Задачи и методы исследования компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения», г. Москва, 2017 г.); 40-м межвузовском семинаре РУДН «Геометрия и расчет тонких оболочек неканонической формы» (г. Москва, 2017 г.). Полностью диссертация докладывалась и обсуждалась на семинарах кафедры строительных

конструкций и вычислительной механики (руководитель – член-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф. Г.Г. Кашеварова), кафедры математического моделирования систем и процессов ПНИПУ (руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. П.В. Трусков), кафедры композиционных материалов и конструкций (руководитель – д-р техн. наук, проф. А.Н. Аношкин), института механики сплошных сред УрО РАН (руководитель – академик РАН, д-р техн. наук, проф. В.П. Матвеев).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 5 статей в изданиях, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий и журналов, рекомендованных ВАК РФ для группы научных специальностей 05.13.00.

**Личный вклад автора.** Постановка задачи (совместно с научным руководителем), разработка математических моделей, их программная реализация в разработанной экспертной системе для определения категорий технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций, внедрение экспертной системы в оценку технического состояния конструкций промышленного здания массового строительства.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и 8 приложений. Текст изложен на 208 страницах, содержит 63 рисунка и 19 таблиц.

# 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

## 1.1 Основные положения диагностики технического состояния конструкций зданий и сооружений

*Техническая диагностика* – область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов [1]. *Основная цель* диагностики технического состояния конструкций зданий и сооружений – обеспечение безопасности, функциональной надёжности и эффективности работы технического объекта, а также сокращение затрат на его техническое обслуживание и уменьшение потерь в результате отказов и преждевременных выводов в ремонт. *Основными задачами* технической диагностики является обнаружение дефектов и повреждений конструкций и причин их появления, определение эксплуатационной пригодности (на момент диагностирования), а также прогнозирование технического состояния конструкций.

*Техническое состояние* – это совокупность свойств здания (сооружения) или его элементов (конструкций), характеризующаяся в определенный момент времени *признаками*, установленными нормативной и технической документацией. Признаками технического состояния могут быть как *количественные*, так и *качественные характеристики* свойств элементов (строительных конструкций) здания.

Техническое состояние конструкций и здания (сооружения) в целом подвержено изменению при непрерывных воздействиях внутреннего и внешнего характера в процессе строительства, реконструкции, эксплуатации и ремонта. Воздействия внутреннего характера возникают в результате физико-химических процессов, протекающих в материалах конструкций. Внешние причины:



нагрузки, климатические условия, условия окружающей среды, качество эксплуатации.

Техническое состояние конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений может меняться постепенно или стремительно, в зависимости от конструктивных особенностей. Процесс изменения технического состояния является обычно закономерным явлением, но может иметь и случайный характер [2].

Последствием изменения технического состояния конструкции является ухудшение количественных значений характеристик работоспособности, что, соответственно, влечет снижение *надежности* [3] и *безопасности эксплуатации* не только самой конструкции, но также части или всего объекта в целом.

Требования к безопасности эксплуатации зданий (сооружений), функционально связанные с требованиями по надежности, контролируются в РФ на государственном уровне Федеральным законом № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [4]. Поэтому *техническое состояние является главным критерием* в принятии решений о необходимости проведения мероприятий по приведению строительного объекта к дальнейшей нормальной безопасной эксплуатации.

Неотъемлемой составляющей безопасности зданий и сооружений является ***обследование технического состояния*** строительных конструкций посредством *периодических осмотров и контрольных проверок* и (или) *мониторинга состояния основания, строительных конструкций* и систем инженерно-технического обеспечения. Это комплекс мероприятий по определению и оценке фактических значений контролируемых параметров, характеризующих работоспособность объекта обследования и определяющих возможность его дальнейшей эксплуатации, реконструкции или необходимость восстановления, усиления, ремонта [5]. Указанные мероприятия включают в себя обследование грунтов основания и строительных конструкций на предмет выявления изменения свойств, деформационных повреждений, дефектов несущих конструкций и определения их фактической несущей способности.

В настоящее время, подчеркивается **необходимость системного подхода к научным исследованиям** в области комплексной безопасности и предотвращения аварий зданий и сооружений [6].

Строительные конструкции и элементы могут иметь несколько состояний, соответствующих эксплуатационной пригодности, оценка которых зависит от доли снижения несущей способности и эксплуатационных характеристик. Согласно действующим правилам инженерного обследования и мониторинга строительных объектов, результатом оценки является **категория технического состояния** (одна из 4-х возможных): 1 – нормативное техническое состояние; 2 – работоспособное техническое состояние; 3 – ограниченно работоспособное техническое состояние; 4 – аварийное техническое состояние [5].

*Нормативное техническое состояние* – категория технического состояния, при котором количественные и качественные значения параметров всех критериев оценки технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений, соответствуют установленным в проектной документации значениям с учетом пределов их изменения.

*Работоспособное техническое состояние* – категория технического состояния, при которой некоторые из числа оцениваемых контролируемых параметров не отвечают требованиям проекта или норм, но имеющиеся нарушения требований в конкретных условиях эксплуатации не приводят к нарушению работоспособности, и необходимая несущая способность конструкций с учетом влияния имеющихся дефектов и повреждений обеспечивается.

*Ограниченно-работоспособное техническое состояние* – категория технического состояния строительной конструкции или здания и сооружения в целом, при которой имеются крены, дефекты и повреждения, приведшие к снижению несущей способности, но отсутствует опасность внезапного разрушения, потери устойчивости или опрокидывания, и функционирование конструкций и эксплуатация здания или сооружения возможны либо при контроле (мониторинге) технического состояния, либо при проведении

необходимых мероприятий по восстановлению или усилению конструкций и (или) грунтов основания и последующем мониторинге технического состояния (при необходимости).

*Аварийное состояние* – категория технического состояния строительной конструкции или здания и сооружения в целом, характеризующаяся повреждениями и деформациями, свидетельствующими об исчерпании несущей способности и опасности обрушения и (или) характеризующаяся кренами, которые могут вызвать потерю устойчивости объекта.

На основании результатов обследования строительных объектов назначается *категория технического состояния* несущих конструкций, зданий (сооружений) и принимается решение о возможности дальнейшей эксплуатации объекта и его конструкций.

## **1.2 Проблемы назначения категории технического состояния конструкций зданий и сооружений и возможные пути их решения**

Категория технического состояния конструкции зависит от большого числа качественных (видимые повреждения, наличие дефектов строительства и др.) и количественных информативных признаков (фактические и расчетные величины прогибов, ширина раскрытия трещин, механические характеристики материалов др.). Качественным признакам (факторам) сложно дать математическое описание. В процессе измерения количественных признаков состояния конструкции возможны погрешности, поэтому они могут противоречить друг другу, а также противоречить качественным признакам. Это, например, касается измерения геометрических параметров конструкций и сварных соединений, армирования верхних зон изгибаемых железобетонных элементов (балок и плит покрытий и перекрытий), степени повреждения арматуры коррозией, нейтрализации бетона по длине элемента и т.п. *Достоверный ответ на вопрос о категории технического состояния конструкции может быть дан только на основе*

*анализа результатов обследования и поверочных расчетов.* В идеальном случае признаки, характеризующие состояние конструкции, и результаты поверочных расчетов позволяют отнести техническое состояние конструкции к одной и той же категории. Однако часто возникают затруднения в присвоении категории в ситуациях, когда конструкция имеет признаки снижения несущей способности, но поверочные расчеты это не подтверждают. И наоборот: когда конструкция не имеет признаков снижения несущей способности, характерных, например, для ограниченно работоспособного или аварийного состояния, но по результатам поверочных расчетов конструкцию следует отнести именно к этим категориям [7].

В случаях выявления противоречий между результатами осмотра, измерений и поверочных расчетов, производится дополнительное обследование конструкции, анализируются дефекты и причины их появления, уточняются поверочные расчеты (пересматривают влияние выявленных дефектов, оценивают правильность выбранной расчетной схемы и др.). *Несмотря на приложенные усилия по учету влияния всех факторов, окончательное решение зачастую приходится принимать в условиях не снятых противоречий, по сути, интуитивно.*

Неотъемлемой частью инженерного обследования являются экспериментальные исследования материалов. В настоящее время широко применяется неразрушающий контроль прочности и дефектов строительных материалов. Надежность результатов неразрушающего контроля во многом зависит от применяемой приборной базы и квалификации специалиста, осуществляющего контроль. Любому измерению физических величин присущи погрешности. Так значение прочности бетона обследуемой конструкции, определенная поверенными приборами неразрушающего контроля, в ряде случаев существенно отличается от значений прочности бетона, определенных разрушающими методами [8]. Отмечается неопределенность фиксируемых параметров, связанная с приборной составляющей погрешности, которая составляет в среднем от 5 до 15 %, качеством обработки поверхности

материала [9], наличием дефектов в зоне измерений, напряженного состояния конструкции, неравномерной прочностью материала и др. Не всегда возможно использование приборов из-за их непригодности к условиям проведения испытаний и расположения конструкции. Часто конструкции находятся под слоем производственной пыли и мусора, могут иметь несколько слоев старого лакокрасочного покрытия [10], штукатурки, продуктов коррозии материалов конструкции и пр. Например, определение прочности бетона в сжатой зоне изгибаемых конструкций обычно вообще технически невозможно, поскольку, как правило, она скрыта сопрягаемыми конструкциями, при том, что прочности бетона сжатой и растянутой зон могут значительно отличаться друг от друга [11].

Опытные эксперты в области диагностики конструкций зданий и сооружений подчеркивают недостаточность четких рекомендаций по принятию обоснованных решений о техническом состоянии конструкций и зданий в целом, закрепленных в действующих нормативных документах. Отмечается отсутствие связи между нормативными документами, недостаточность сформулированных критериев оценки, немногочисленность и ограниченность признаков отнесения конструкции и здания в целом к той или иной категории технического состояния [12, 13].

Неопределенность вносит отсутствие единых типов шкал измерений дефектов и повреждений, единой шкалы категорий технических состояний в нормативных документах [14], некоторых количественных критериев для отнесения конструкции, здания или сооружения к той или иной категории технического состояния.

«Переход» строительной конструкции из одного технического состояния в другое фактически происходит не «скачкообразно», а через множество промежуточных состояний, границы между которыми размыты. Все это требует от эксперта при назначении категории технического состояния принимать волевые решения, увеличивая долю субъективности в техническом заключении. Присвоение категории, как правило, является точкой зрения одного человека в

конкретный момент времени. Оценку ситуаций, признаков, состояний, аномалий строительных конструкций эксперт выполняет, используя знания не из случайного набора примеров. Он рассматривает их последовательно, логично, в целом и по аналогии. При этом в реальности конструкции с точным набором признаков того или иного технического состояния встречаются крайне редко. В большинстве случаев фиксируется совокупность признаков нескольких состояний одновременно. Другими словами, принадлежность конструкций к техническим состояниям размыта. Эксперт, проводящий обследование, должен установить наиболее значимые признаки из выделенного набора параметров, характеризующего состояние конструкции. А для этого необходим опыт, развивающий у специалиста индивидуальные, личные знания. Эти знания, называемые эвристическими, позволяют экспертам выдвигать разумные предположения, находить подходы к задачам и эффективно принимать решения при нечетких или неполных данных. Отсутствие необходимых знаний и опыта в принятии решений экспертом, недостоверная оценка технического состояния – это как минимум материальные убытки или, что еще хуже, неизбежность *аварии* [15].

Следует также отметить, что готовность человека к воспроизведению информации не постоянна (рисунок 1.1). Она зависит от свойств памяти, физического и эмоционального состояния, времени воспроизведения информации и может различаться по точности, полноте и степени переработки информации [16].

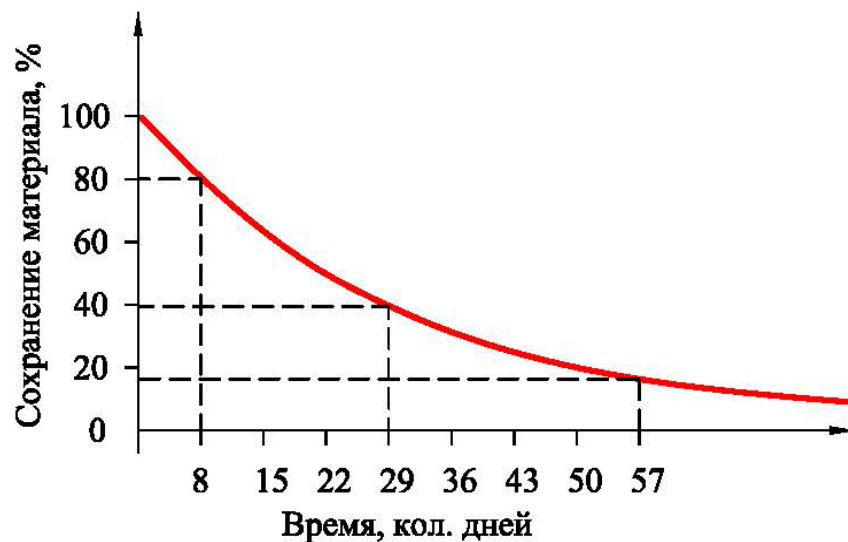


Рисунок 1.1 – Кривая забывания (кривая Эббингауза)

Воспроизведение может быть точным, либо неполным, либо переработанным. Мозг человека устроен как компьютер. Или, наоборот, компьютер создан по образу и подобию мозга человека. В памяти человека выделяют три составляющие: оперативная память (5-20 с.), кратковременная память (от 1 мин. до 5 суток), долговременная память (от 5 суток до бесконечности). У человека тоже есть «оперативная память» и «жесткий диск» – последний на языке психологов означает глубокие уровни памяти. В оперативной памяти человек может недолго хранить огромное количество сведений, которые быстро «улетучатся» если не будут использованы. Надолго откладываются знания только в глубоких уровнях памяти. Существует предположение, что долговременная память служит основой интуиции. Обычные люди не всегда в нужной ситуации способны использовать свой «жесткий диск» [17].

Среди путей решения перечисленных проблем отмечают «ревизию» потенциала страны в сфере обеспечения безопасности зданий и сооружений, совершенствования приборов и методов неразрушающего контроля, методов оценки технического состояния конструкций [6]. Необходима разработка математических моделей и соответствующего комплекса программ диагностики строительных объектов [18, 19]. Необходим переход на новый технологический уровень (рисунок 1.2), ориентированный на компьютерную, интеллектуальную

обработку информации с использованием накопленных консолидированных знаний ученых и специалистов-практиков [20].



Рисунок 1.2 – Связь ресурсов в технологии решения задач диагностики эксплуатируемых строительных объектов: А – существующий технологический уровень; Б – концептуальный технологический уровень

*Автоматизированный поиск экспертного заключения о категории технического состояния снизит повторяемость ошибок и предотвратит « типовые » аварии, окажет помощь в работе не только начинающему, но и опытному эксперту.*

*Для автоматизированного поиска экспертного решения необходимо выполнить группировку и классификацию информации, т.е. систематизацию знаний. Конкретные признаки, факторы должны рассматриваться как элементы категорий технического состояния конструкции. А для этого необходимо разработать структурные модели, математические методы и алгоритмы, позволяющие последовательно увязать решения на различных этапах оценки технического состояния конструкций.*



### **1.3 Современные методы, модели и технологии в представлении знаний (Исследование подходов к моделированию представления знаний)**

Основной принцип представления (инженерии) знаний заключается в сведении работы хорошего эксперта к некоторому строгому алгоритмическому процессу за счет ее компьютеризации. Извлечение знаний, их формулировка, организация и внесение в ЭВМ для обеспечения их эффективного использования являются главными задачами этой области.

Знания – это сочетание теоретического понимания проблемы и эмпирических правил. Знания разделены на декларативные и процедурные. Источники знаний – база теоретических и практических исследований в технической диагностике конструкций, нормативная и методическая документация, научные исследования и эвристические знания специалистов, представленные на естественном языке

Среди современных способов моделирования знаний и вывода решений наибольшее внимание уделяется созданию интеллектуальных систем с использованием теории вероятностей, теории нечетких множеств, нейронным сетям.

#### **1.3.1 Вероятностные методы**

Теория вероятностей [21–25] имеет большое значение в методах исследования сложных систем, и является неотъемлемой частью всех количественных наук [26]. Вероятностная оценка, как мера близости альтернатив, используется множеством подходов. Вероятностные методы позволяют определить, в каких пределах будет изменяться искомая величина, т.е. с какой вероятностью ожидать какого-либо события. Вероятность входит в статистику, как науку о количественных соотношениях в массовых общественных явлениях.

Применение вероятностных идей и методов в реальном познании основано на признании фундаментального характера понятия о распределении. Результатом

приложений теории вероятностей к познанию является разработка представлений о статистических закономерностях.

Базовые понятия теории вероятностей – *случайное событие, случайная величина, вероятность и вероятностное распределение*. Системный подход основан на понятиях: *элемент, структура и целостные свойства системы*. Понятие случайного события является вводным при рассмотрении предмета теории вероятностей. Случайность связана с неопределенностью в оценке принадлежности рассматриваемого элемента к обычному множеству.

Элементарные случайные события являются элементами соответствующих вероятностно-статистических систем. Каждое из событий весьма строго индивидуализировано. Совокупность всех событий соответствующего массового явления или процесса называется пространством элементарных событий.

В настоящее время вероятностный анализ имеет большое значение в искусственном интеллекте для проведения рассуждений с учетом неопределенностей. Немногом больше 20 лет назад модель знаний, основанная на вероятностных методах, была одной из самых востребованных в построении экспертных систем. Однако в оценке технического состояния вероятностные методы не всегда смогут обеспечить приемлемую достоверность результатов в условиях отсутствия или недостаточного набора статистических данных. Кроме того, на практике установлено, что с неопределенностью гораздо удобнее работать методами теории нечетких множеств [27]. Например, основополагающему понятию вероятностной меры аппарата теории вероятностей, соответствует довольно простое понятие *функции принадлежности* [28] теории нечетких множеств.

### **1.3.2 «Искусственный интеллект» или «разумные решения и логические рассуждения»**

Возможность автоматизации решения задач экспертной деятельности по диагностике строительных конструкций в условиях неопределенности

целесообразно искать в области систем *искусственного интеллекта* [29]. Термин «*artificial-intelligence*» (в переводе с английского на русский язык означает «искусственный интеллект» или «разумные решения и логические рассуждения») введен американским ученым Джоном Маккарти в 1956 году [30].

В представлении знаний высокую популярность приобрел класс неточных, приближенных методов решения задач, исходной моделью которых служит человеческое мышление. Методы этого класса объединены понятием **мягкие вычисления** (*Soft Computing*), введенным Л. Заде в 1994 году [31]. Они обладают возможностями решения задач управления со слабо структурированными объектами управления [32]. Основу мягких вычислений составляют такие теории как нечеткая логика, искусственные нейронные сети и генетические алгоритмы.

**Теория нечетких множеств** (*Fuzzy Sets*) основана (1965 г.) и развивается в последующих работах американским математиком и логиком Л. Заде [27, 31–42]. Применение этой теории дает возможность строить формальные схемы решения задач, характеризующиеся той или иной степенью неопределенности, которая может быть обусловлена неполнотой, внутренней противоречивостью, неоднозначностью и размытостью исходных данных, представляющих собой приближенные количественные или качественные оценки параметров объектов. В основе теории лежит представление о различной степени принадлежности элементов со сходными свойствами, составляющих некоторое множество. Эти представления характеризуются функциями принадлежности. Возможность указать степень, достоверность, удовлетворенность принадлежности элементов к рассматриваемым множествам позволяет решить проблему несовместимости приближенных и нечетких суждений человека с четкими командами компьютера.

Превосходство разума эксперта в решениях задач технической диагностики проявляется благодаря тому, что человек думает и пользуется словами. Приобретение знаний, обработка неполной информации, анализ сложных систем в недостоверных условиях сопровождаются мышлением на естественном языке. Сущность эксперта проявляется не в вероятностной природе, а в нечетких тезисах. Его мышление представляет собой нечеткий механизм.

Модели и методы, основанные на теории нечетких множеств и нечеткой логике, оказываются проще для формального описания неопределенностей, в сравнении с другими альтернативными методами построения механизма рассуждений.

**Теория искусственных нейронных сетей** (*Artificial Neural Networks*) [37, 39–41, 43, 44] является результатом исследований нейрокибернетиков, приложивших много усилий к созданию элементов, аналогичных нейронам (нервным клеткам человеческого мозга), и их объединению в функционирующие системы. Большинство искусственных нейронных сетей моделируют простые свойства биологических нейронов. Нейронные сети с биологией связаны лишь заимствованными у нее терминами. Каждый элемент такой сети, нейрон, является независимым элементом и функционирует по простым правилам. В большинстве сетей выход нейрона зависит от взвешенной суммы входных сигналов. Элементы сети обычно имитируют свойства биологического нейрона. Особым свойством нейронных сетей является их способность к обучению. Сеть обучают до тех пор, пока заданному множеству входов не будет соответствовать желаемое множество выходов. Обучение, как правило, проводят, имея выборку экспериментальных данных. Количество входов нейронной сети равно числу информативных признаков, а количество выходов равняется числу их возможных классов, групп, категорий.

Искусственные нейронные сети являются перспективным инструментом в создании интеллектуальных систем. Нейронные архитектуры совместно с алгоритмами *эволюционных вычислений* дают модели параллельной обработки данных – модели, которые хорошо справляются с большим количеством информации.

Но фактором, сдерживающим применение нейронных сетей в диагностике конструкций, является невозможность содержательной интерпретации процесса принятия решения, большие трудозатраты и высокая сложность. Нейронную сеть можно обучить, но нейронная сеть не может обучить пользователя. Несмотря на

преимущества в этом вопросе гибридных систем, пока не представляется возможным использовать их в экспертной системе для оценки технического состояния строительных конструкций в силу отсутствия, на данный момент, исходных данных, необходимых для построения обучающей выборки. Отсутствие выборки делает невозможным выполнение тонкой настройки [37] такой системы. Следует предположить, что обучающая выборка может быть сформирована только после опытно-экспериментального применения программы (с более простым механизмом рассуждений) в реальной оценке технического состояния конструкций.

**Эволюционные вычисления** (*Evolution Computation*) представляют собой приближенные методы оптимизации, основанные на итерационных процессах, имитирующих эволюцию и поведение биологических организмов. Условием применения этой технологии является наличие алгоритма вычисления целевой функции, наличие большой выборки экспериментальных данных. Сведения о структуре системы не влияют на результаты решений. Эволюционные вычисления применяют в проектировании сложных технических систем и управлении процессами. С помощью эволюционных вычислений вырабатываются новые решения на основе результатов предыдущих решений одной и той же задачи. К группе этих вычислений относятся *генетические алгоритмы* (*Genetic Algorithm*) [37, 39, 40, 45, 46], *метод роя частиц* (*Particles Swarm Optimization*) [47, 48], *алгоритм колонии муравьев* (*Ant Colony Optimization*) [49] и др.

Наибольшее практическое применение в задачах оптимизации получили генетические алгоритмы. Генетический алгоритм – это стохастический метод поиска в многомерном пространстве, использующий случайный подбор, комбинирование и вариации искомых параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию. Информационные признаки рассматриваются в образе хромосом, состоящих из генов, которые обычно являются элементами управления процесса решения. Генетические операторы, такие как скрещивание и мутация, вырабатывают с каждым «поколением»

лучшие решения. Действия повторяются итеративно, моделируя «эволюционный процесс». До выполнения критерия остановки алгоритма (нахождение оптимального решения, исчерпание времени или числа поколений) проходит несколько жизненных циклов (поколений).

Компоненты мягких вычислений могут быть использованы самостоятельно или в различных комбинациях (гибридные системы) для высокоэффективного решения прикладных задач с факторами неопределенности [50]. Совместное действие существенно превосходит эффект каждого отдельного компонента. Однако, несмотря на явные преимущества использования гибридных систем, например гибридных нейронных сетей, на практике возможности их применения ограничены отсутствием или недостаточным количеством исходных данных.

### 1.3.3 Экспертные системы

В начале восьмидесятых годов XX века в исследованиях по искусственному интеллекту сформировалось самостоятельное направление, получившее название «экспертные системы» [51–53] которые при решении сложных задач по принятию решений в условиях многофакторности и неоднозначности, получают результаты, не уступающие по качеству и эффективности решениям, получаемым опытным человеком-экспертом. Эти решения обладают «прозрачностью», т.е. могут быть объяснены пользователю на качественном уровне, что обеспечивается их способностью «рассуждать» о своих знаниях и умозаключениях. Экспертные способны пополнять свои знания в ходе взаимодействия с экспертом.

*Экспертная система (Expert System)* – это компьютерная программа, способная автоматизировать мыслительную деятельность человека, взяв на себя функции человека-эксперта или «работать» в качестве ассистента в группе лиц или лица, принимающего решение в разрешении проблемной ситуации.

Анализ мирового опыта показывает, что технология экспертных систем используется для решения различных типов задач (управления, интерпретация, диагностики, планирования, конструирования, контроля и др.) в самых

разнообразных проблемных областях. Среди них – нефтяная и газовая промышленность, энергетика, транспорт, медицина, космос, металлургия, горное дело, химия, телекоммуникации и связь, экология и др. В строительной отрасли технология экспертных систем также вызывает определенный интерес, о чем свидетельствуют как зарубежные, так и отечественные публикации.

Экспертные системы не призваны заменить эксперта в его непосредственной деятельности, а расширяют и усиливают профессиональные возможности их пользователей [51]. Они могут оперировать с базой слабо формализуемых знаний о проблемной области, позволяют принимать решения на основе неполной, нечеткой и противоречивой информации. В экспертных системах аккумулирован опыт и знания авторитетных и высококвалифицированных специалистов. При этом они не могут быть применены для решения близких, но не предусмотренных при их создании, проблем.

От других программ экспертную систему отличают наличие базы знаний и решателя (машина вывода) - редактора базы знаний (рисунок 1.3).

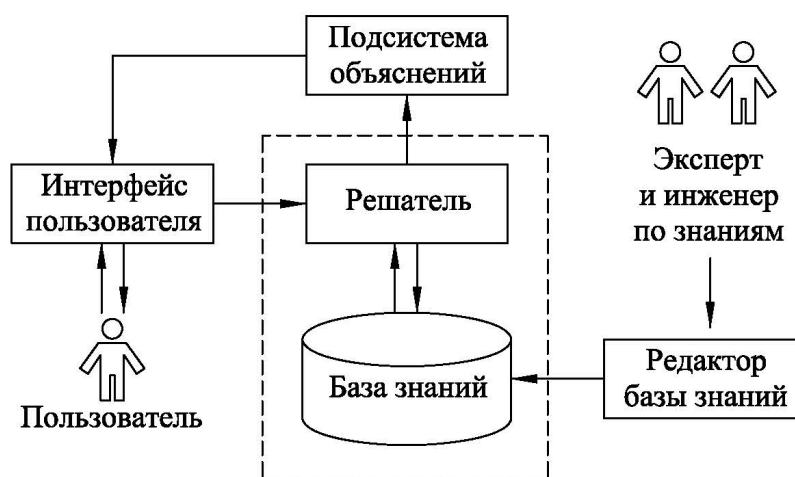


Рисунок 1.3 – Структура экспертной системы

**База знаний** является основой функционирования, наиболее трудоемким и ценным компонентом экспертной системы. Это совокупность знаний (фактов, правил и утверждений) предметной области, т. е. области человеческой деятельности, к решению задач которой применяется данная технология. Знания в

базу знаний записываются в определенном формате (на языке представления знаний), на нем же ведется диалог базы знаний с другими компонентами экспертной системы. Запись знаний обычно приближена к естественному языку, поэтому понятна и неспециалистам в программировании, например экспертам. База знаний также может содержать информацию о связях между подзадачами различных уровней.

**Решатель (машина вывода)** воспроизводит ход рассуждений эксперта на основании знаний, заложенных в базу знаний. Решатель и база знаний, с точки зрения построения экспертной системы, представляют *наибольший научный интерес*.

Для внесения изменений в базу знаний разработчиками экспертной системы, предусматривается **редактор базы знаний**, который позволяет добавлять новые знания или редактировать существующие. Для получения ответов на интересующие пользователя вопросы, разъяснений выдаваемых заключений, предусматривается **подсистема объяснений**. общение экспертной системы с пользователем на стадиях ввода информации и получения результатов реализует **интерфейс пользователя** (рисунок 1.3).

Схема, представленная на рисунке 1.3, помимо модулей экспертной системы, включает в себя также людей: пользователь (лицо, для которого предназначена экспертная система); эксперт (высококвалифицированный специалист предметной области, поделившийся своим опытом); инженер по знаниям (специалист по искусственному интеллекту, проектирующий и создающий экспертную систему, выступающий в роли посредника между экспертом и базой знаний).

Экспертные системы обладают рядом преимуществ, в сравнении с человеческими возможностями:

- знания, заложенные в экспертные системы, не изменяются со временем, но их можно корректировать по мере накопления новых знаний, не снижаются в связи с отсутствием практики;



- экспертные системы способны воспринимать, удерживать и обрабатывать большие объемы информации, быстро воспроизводить решения.
- экспертные системы не могут преднамеренно исказить или скрыть результаты решений (если это не предусматривают ее разработчики),
- являясь компьютерной программой, экспертные системы легко распространяются.

Создание экспертной системы в каждой узкой предметной области требует выполнения *новаторской работ* [53].

Процесс проектирования является достаточно неформальным, так как связан с исследованием и попыткой копирования деятельности человека. Особенностью разработки экспертной системы является поэтапное ее внедрение. Процесс разработки экспертной системы обычно осуществляется по методологии *постепенно нарастающей разработки на основе быстрого прототипирования* и условно делится на шесть этапов (рисунок 1.4) [54].



Рисунок 1.4 – Этапы разработки экспертной системы (ЭС)

Последовательность этапов строго не фиксирована и может быть размыта. Решения каждого этапа могут повлиять на результаты предыдущих, вплоть до полной переработки.

**Прототип** экспертной системы – это ее усеченная версия, предназначенная для демонстрации возможности реализации выбранных подходов, а также для проверки правильности создания базы знаний. Методология разработки прототипа условно состоит из нескольких стадий (рисунок 1.5).

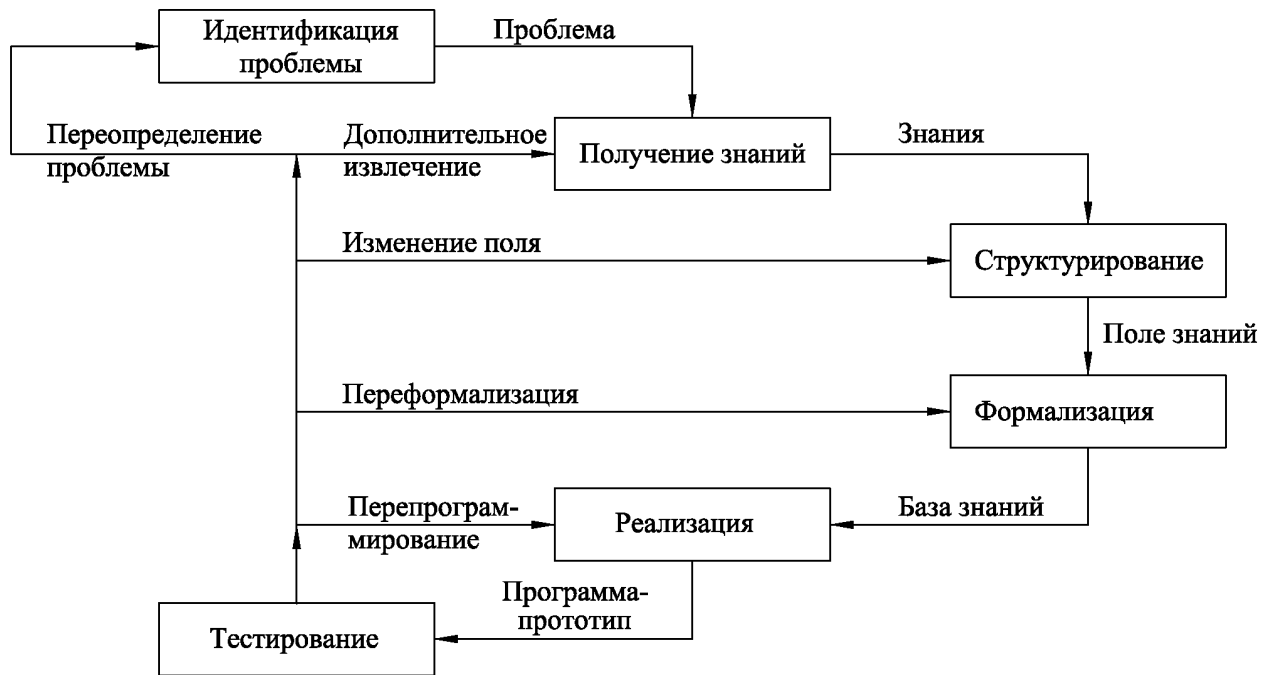


Рисунок 1.5 – Стадии разработки прототипа экспертной системы

Прототип должен продемонстрировать пригодность методов инженерии знаний, выбор математических моделей для данного приложения. По мере увеличения знаний прототип должен достигнуть такого состояния, когда он успешно решает все задачи данного приложения.

Перечень методов, моделей и технологий искусственного интеллекта, применяемых для построения машины вывода экспертных систем, широк и трудно классифицируем. Границы их применимости определяются характером исходной информации решаемых задач, целью решения, возможностью внедрения в ЭВМ или другие технические устройства. Появление инструментальных средств в искусственном интеллекте для манипуляции высказываниями, стало возможным благодаря достижению некоторого уровня математической формализации в логике, вычислениях и теории вероятностей.

## 1.4 Обзор исследований по применению технологий искусственного интеллекта в строительной отрасли

Первые попытки применения технологий искусственного интеллекта в строительной отрасли отмечены в середине 80-х годов прошлого столетия. На данный момент это направление по-прежнему вызывает определенный интерес и развивается. Количество исследований в разработке и применении экспертных систем здесь непрерывно растет, о чем свидетельствуют зарубежные и отечественные публикации. Оценка проектов, диагностика, принятие решений и прогнозирование, проектирование зданий и сооружений, оптимизация проектных решений – это, далеко неполный, список исследований по разработке и применению экспертных систем в строительстве.

Много работ направленно на *поддержку принятия решений на стадии проектирования*, среди которых: разработка модели генетических алгоритмов для планирования линейных строительных объектов для снижения их стоимости и сроков проектирования [55]; модель оценки влияния строительства на окружающую среду [56]; разработка модели генетического алгоритма для оптимизации стальных многоэтажных рам [57]; метод оценки риска проекта для снижения субъективности в принятии решений на основе теории нечетких множеств [58]; нечеткая полиномиальная нейронная сеть для прогнозирования прочности бетона на сжатие [59]; исследование искусственных нейронных сетей для прогнозирования прочности бетона в зависимости от состава бетонной смеси, формы, размеров, условий эксплуатации, условий окружающей среды и других факторов [60]; исследование работы экспертной системы с применением нейронных сетей для оценки грунтовых сооружений из условия оптимального землепользования [61]; прототип экспертной системы для подбора состава бетонной смеси и получения рекомендаций к ее приготовлению, основанный на литературных источниках и эвристических знаниях эксперта [62].

Хорошие результаты достигнуты в применении искусственного интеллекта *в решениях задач возведения зданий и сооружений*. Среди них: нейро-нечеткая

экспертная система *EFNIS* для поддержки принятия решений в геотехнической экспертизе [63]; экспертная система *CoSPEC (Construction Site Preparation Expert System)* для решения строительных задач [64]; экспертная система для определения прочности опор [65]; экспертная система для адаптации строительства тоннелей на основе совместного использования векторов перемещений опор (*Support Vector Machine*) и метода роя частиц [66]; исследование применения многоцелевого нечеткого роя частиц для оптимизации времени, качества и затрат на строительство [67]; модель деловой репутации подрядчика при строительстве здания [68].

Значительная часть исследований по созданию интеллектуальных систем в строительной отрасли сосредоточена **на диагностике конструкций зданий и сооружений**. В числе их результатов: экспертная система *MDDS (Masonry Damage Diagnostic System)* для диагностики кирпичной кладки [69, 70]; экспертная система *DIASYN (Diagnosis Synthesis)* для диагностики железобетонных мостов [71]; экспертная система *REPCON (Repair of Concrete)* для составления перечня ремонтных мероприятий бетонных конструкций [72]; разработка модели для оценки последствий повреждений мостов [73]; система оценки срока службы железобетонных настилов мостов, основанная на мягких вычислениях [74]; разработка модели для оценки трещин в железобетоне [75]; разработка модели для оценки коррозии стальных труб [76]; экспертная система «ВАТС» для определения технического состояния строительных конструкций зданий старой городской застройки [12]; экспертная система для диагностики причин трещин строительных конструкций на основе мягких вычислений [77]; экспертная система для оценки технического состояния железобетонных зданий по результатам визуального обследования [78]; методика извлечения информации из результатов наземного лазерного сканирования о наличии биологических отложений на поверхности железобетонных конструкций [79]; программные средства, предназначенные для решения задачи кластеризации технического состояния зданий и сооружений в условиях неопределенности в сфере оценки недвижимости и качества строительных работ [80]; модель

идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе результатов ее обследования [81].

Наибольшее внимание в диагностике зданий и сооружений исследователями уделено задачам определения причин появления дефектов и повреждений конструкций и прогнозированию возможности эксплуатации объектов. Штовба С.Д. и Панкевич О.Д. проанализировали возможности применения мягких вычислений для определения *причины появления трещин* в кирпичных стенах по результатам визуального обследования [77]. В работе Солдатенко Т.Н. [81] показана возможность применения аппарата теории нечетких множеств не только для идентификации, но и для прогноза дефектов каменных стен. Основным элементом моделей этих экспертных систем, является нечеткая база знаний, сформированная с использованием знаний специалистов рассмотренной предметной области. Предложенные подходы показали свою работоспособность и актуальность применения для снижения уровней неопределенности в конечных заключениях.

Соколов В.А. в работах [12] предложил подход для исследования технического состояния конструкций и зданий старой городской застройки, основанный на вероятностных методах распознавания состояний. Предлагается использование теоретического математического аппарата технической диагностики, изначально разработанного для диагностирования состояний сложных технических систем (радиолокация, радиоэлектроника, самолетостроение и др.). По глубокому убеждению автора этого подхода, из опыта его многолетней практической деятельности в диагностировании различных объектов, в целях снижения субъективизма распознавание состояний строительных систем основывалось на рассмотрении, *пяти состояний*, категории которых (названия) сформулированы, аналогично СП 13-102-2003 [82]: *исправное техническое состояние* (1-я категория); *работоспособное техническое состояние* (2-я категория); *ограниченно работоспособное техническое состояние* (3-я категория); *недопустимое техническое состояние* (4-я категория); *аварийное техническое состояние* (5-я категория).

В основу построения диагностических процедур положены теоретические разработки И.А. Биргера. Конструкция и все здание рассматривается как система, которая на момент обследования находится в одном из  $n$  случайных состояний  $S_i$ . Состояние конструкций характеризуется совокупностью признаков  $K^*$ , каждый из которых характеризует это состояние с определенной долей вероятности. Диагностируемая совокупность признаков  $K^*$ , относится к одному из возможных состояний (диагнозов – упоминается в работах исследователя)  $S_i$  с помощью правила, установленного из основных соотношений теории вероятности (применительно к диагностированию состояния строительной системы). Решения основаны на соотношении теории вероятностей применительно к задачам диагностирования состояний строительных систем, на обобщенной формуле Байеса следующего вида:

$$P(S_i / K) = \frac{P(S_i)P(K^*/S_i)}{\sum_{s=1}^n P(S_s)P(K^*/S_s)}, \quad (1.1)$$

где  $P(S_i / K^*)$  – вероятность диагноза  $S_i$  после того, как стали известны результаты обследования по комплексу признаков  $K^*$  (искомая апостериорная вероятность состояния);  $P(S_i)$  – вероятность состояния  $S_i$ , определяемая по статистическим данным (так называемая, априорная вероятность состояния);  $P(K^*/S_i)$  – статистическая вероятность появления признаков в каждом состоянии.

Решающее правило, в соответствии с которым принимается решение о конкретном диагнозе, состоит в том, что объект с комплексом признаков  $K^*$  относится к состоянию  $S_i$ , если апостериорная вероятность этого состояния  $S_i$  является наибольшей:

$$K^* \in S_i, \text{ если } P(S_i / K^*) > P(S_j / K^*), j = 1, 2, \dots, n; i \neq j. \quad (1.2)$$

Правило (1.2) дополняется введением понятия порогового значения для вероятности диагноза  $S_i$ , представляющего собой некий выбранный и обоснованный уровень распознавания  $P_i$ :

$$P(S_i/K^*) \geq P_i. \quad (1.3)$$

В работах И.А. Биргера отмечено, что величину  $P_i$  предлагается принимать  $P_i \geq 0,9$ . Указано, что при условии

$$P(S_i/K^*) < P_i. \quad (1.4)$$

решение о диагнозе не принимается (предлагается отказ от распознавания) и требуется поступление дополнительной информации. Учитывая диагностирование пяти состояний, Соколов скорректировал подход Биргера, внесением предложений о назначении пороговых значений вероятностей диагнозов  $S_i$  для строительных конструкций.

В работе Соколова В.А. предложено разделение, а затем комбинирование пяти априорных вероятностей состояний по принципу «3 + 2», вводятся априорные вероятности  $P(S_u)$  и  $P(S_{nu})$  и апостериорные  $P(S_u/K^*)$  и  $P(S_{nu}/K^*)$ . Проведенное исследование дало основание для принятия решения о назначении вероятностного порогового уровня распознавания состояний строительных систем в виде  $P_i = 0,690$ . Решающее правило (1.2) скорректировано с учетом этих уточнений:

$$P(S_u/K^*) = P(S_1/K^*) + P(S_2/K^*) + P(S_3/K^*) > P_i = 0,690 \quad (1.5)$$

– для первых состояний,

$$\text{или } P(S_{nu}/K^*) = P(S_4/K^*) + P(S_5/K^*) > 1 - P_i = 0,310 \quad (1.6)$$

– для остальных состояний.

Для основных конструкций рассматриваемых зданий построены специальные вероятностные таблицы – диагностические матрицы, основанные на материале по статистике состояний (диагнозов) и характерных повреждений (диагностических признаков) конструкций, упорядоченном и уложенном в рамки имеющихся, разработанных методик теоретического аппарата технической диагностики и теории информации. По мнению Соколова В.А., для диагностирования состояний здания в целом, как сложной многоэлементной строительной системы, необходима разработка многоуровневых моделей

принятия решений о распознавании диагнозов отдельных конструктивных элементов, групп элементов, а также подсистем всех уровней этой системы. В его работе отмечена также важность разработки методологий построения многоуровневой, иерархической структуры диагностики состояний конструкций, позволяющей оценивать техническое состояние, надежность и физический износ элементов структуры на каждом, интересующем пользователя, уровне. На этой основе построена графическая модель диагностирования в виде «диагностического дерева», а также разработан алгоритм и программный продукт «ВАТС», реализующий расчеты для уровневого анализа вероятностных параметров состояний конструктивных элементов, групп элементов, подсистем и системы высшего уровня иерархии – здания в целом. Примечательно, что для оценки устойчивости и информативности диагностической матрицы, построенной для железобетонной балки с использованием байесовского подхода, в отмеченном исследовании В.А. Соколов использовал методы нечеткой логики. По результатам расчетов, выполненных на основе теорий вероятностей и теории нечетких множеств, был сделан вывод об удовлетворительном согласовании выходных параметров, при одинаковых исходных данных (входах). Исследователем подчеркнуты высокие возможности и достоинства аппарата теории нечетких множеств в диагностировании состояний строительных конструкций.

*Коняева Е.И.* предложила и исследовала альтернативный подход к оценке состояний зданий и сооружений, основанный на экспертном оценивании технического состояния [80]. Актуальность подхода, как отмечается в работе, обусловлена высокой сложностью и стоимостью выполнения инструментального обследования. Сложность задачи классификации технического состояния здания и сооружения, характеризующаяся затруднениями принятия обоснованных решений в определении класса принадлежности объекта оценки по выбранному набору элементов, предлагается по итогам исследований решать при помощи алгоритмов нечеткой кластеризации, основанных на использовании нечетких множеств (первого или второго типа) совместно с генетическими алгоритмами. Использование предложенных методов кластеризации технического состояния



зданий и сооружения позволяет создать качественно новые программные средства, расширяет перечень задач поддержки принятия решений в условиях неопределенности. Однако использование экспертного оценивания имеет высокую актуальность, прежде всего, в сфере оценки недвижимости при определении стоимости объекта недвижимости и жилищно-коммунального хозяйства с целью планирования ремонтных работ. При этом и в этих сферах применения, как отмечено в исследовании, метод экспертного оценивания по некоторым критериям не исключает необходимость проведения детального (инструментального) обследований технического состояния зданий и сооружений.

*Hamdia K. M.* провел исследование по разработке экспертной системы для оценки технического состояния зданий с железобетонными несущими конструкциями [78]. В рамках исследования была разработана экспертная система для неопытных инженеров-строителей, способная помочь в определении технического состояния здания по результатам визуального обследования. Оценка технического состояния здания предусматривалась в работе по шкале, включающей пять категорий: «*Very good*», «*Good*», «*Moderate*», «*Bad*», «*Very bad*». Механизм решения задачи по определению технического состояния здания основан на использовании весовых значений различных критериев оценки. Исследователем назначены и классифицированы критерии оценки в соответствии со специально разработанной иерархической структурой знаний. В перечень критериев вошли признаки технического состояния конструкций, учитываемые в ходе их визуального осмотра и простых измерений, не требующих применения специального оборудования и долгосрочных исследований. Процесс построения иерархии основан на принципе деления задач на более простые ее составляющие – подзадачи, подставляемые в иерархическую структуру на нижние уровни. Каждый элемент иерархии представляет различные аспекты решаемой задачи. Процесс деления задач проводился до достижения таких уровней, в которых можно однозначно дать ответ о степени влияния и значимости сравниваемых альтернатив. Оценка весовых значений критериев оценки проводилась исследователем с использованием нечеткого метода анализа иерархий. Для

элементов построенной иерархической структуры, с помощью процедуры парных сравнений, с привлечением экспертов, определены приоритеты, представляющие их относительную важность или предпочтительность. Безразмерные приоритеты заложены в базу данных системы и позволяют сравнивать разнородные факторы, обеспечивая наследование результатов обработки информации от низших уровней иерархии к высшим уровням. Количественная формализация критериев оценки проводится с использованием понятий нечеткой логики, знаний американских и европейских строительных норм и правил, зарубежной технической литературы, посвященной исследованиям по диагностике железобетонных конструкций зданий и сооружений. Входными данными для системы являются результаты обследования в виде лингвистических и численных значений. Входы выражаются в виде нечетких множеств с соответствующими значениями степеней принадлежности к признакам, а затем, поэтапно, классами объединяются с помощью весовых коэффициентов и нечеткой композиции. Последовательное объединение результатов решений на каждом уровне доходит до самого высокого уровня – цели решения в виде оценки технического состояния здания. По утверждению *Hamdia K. M.*, результаты, полученные с помощью представленной системы, показали хорошее сходство с мнением экспертов. Однако следует отметить и то, что с некоторыми знаниями, заложенными в эту систему, опытный российский инженер-строитель не согласится.

Обобщая рассмотренные исследования и их результаты, можно сделать вывод, что методы и модели искусственного интеллекта имеют большие перспективы их практического применения в промышленном и гражданском строительстве. Большая доля работ посвящена технической диагностике строительных объектов, при этом следует отметить *малое число исследований по разработке математических моделей для комплексной оценки технического состояния строительных конструкций с учетом глубокого анализа результатов визуального и инструментального обследования, а также расчетной оценки напряженного состояния.*

### **1.5 Структурная модель перспективной комплексной интеллектуальной системы обследования строительных объектов**

На основании изучения проблем оценки технического состояния строительных конструкций, принимая во внимание современное состояние вопроса применения математических моделей из области искусственного интеллекта, разработана комплексная модель перспективной интеллектуальной системы обследования строительных объектов (рисунок 1.6) массового строительства, включающая несколько экспертных систем. Предлагаемая система включает в себя несколько экспертных систем, способных работать как в отдельности, и как единое целое. При их создании предлагается использовать математические модели теории искусственного интеллекта. Базовый принцип создания основан на том, что объектом управления является не конструкция, и не здание или сооружение, а аналитический процесс каждого этапа обследования. Активный элемент системы – лица, принимающие решения.

В силу масштабности данной системы в диссертационной работе представлено исследование построения и реализации математических моделей для подсистемы, предназначенной для определения категорий технического состояния конструкций.



Рисунок 1.6 – Структура комплексной интеллектуальной системы обследования конструкций объектов массового строительства

## 1.6 Выводы по главе 1

- Существуют объективные проблемы в оценке технического состояния строительных конструкций: сниженная производительность процесса определения категории технического состояния, связанная с большим набором условий и нечеткостью исходных данных для выполнения сложного анализа, ограниченного временем; недостаточная эффективность передачи опыта и знаний при подготовке специалистов для обследования и мониторинга конструкций, зданий и сооружений в данной предметной области.
- Современное состояние применения математических моделей в вопросах оценки технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений говорит об отсутствии в этой сфере системного инструмента принятия решений в условиях неопределенности и многофакторности. Отсутствуют математические модели для перевода результатов обследования конструкции эксплуатируемых

зданий и сооружений в точный количественный показатель степени ее эксплуатационной пригодности.

- Одним из перспективных путей снижения неопределенности, повышения качества и достоверности результатов оценки технического состояния строительных конструкций является разработка математических моделей и реализация численных методов принятия решений из области искусственного интеллекта в экспертных системах для практического применения в обследовании конструкций на ролях «компетентного партнера».

- Перспективы лучшей реализации интеллектуальных экспертных систем для оценки технического состояния строительных конструкций в условиях многофакторности и неопределенности обеспечит разработка математических моделей с применением теории нечетких множеств и нечеткой логики, способных внести в данную предметную область методологию системного анализа.

- Качество решений в этой практической деятельности, очевидно, следует повышать разработкой математических моделей процессов принятия решений на всех этапах диагностирования конструкций зданий и сооружений и их реализацией в виде комплексов проблемно-ориентированных программ.

## **2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЕКЛАРАТИВНЫХ ЗНАНИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОНТОЛОГИЙ**

Знания по диагностике технического состояния строительных конструкций, как и во многих других предметных областях, представлены на естественном языке. Это осложняет проведение вычислительных экспериментов, разработку соответствующих комплексов программ, освоение программ пользователями. Поэтому необходимы новые формы хранения, представления, формализации и систематизации накопленной информации («знаний»). Решение этих потребностей предлагается связать с разработкой онтологий, позволяющих эффективно обрабатывать сложную и разнообразную информацию. Термин «Онтология» – это формальное описание результатов концептуального моделирования предметной области, представленная в форме, воспринимаемой человеком и компьютерной системой. «Онтология» в теории искусственного интеллекта – это знания, формально представленные в виде описания множества объектов, понятий и связей между ними.

Формальные онтологические модели позволяют обеспечить с одной стороны описание понятий предметной области, а с другой стороны обладают хорошими вычислительными свойствами. Они позволяют создавать сложные понятия и отношения из простых, дают возможность компьютерной обработки, автоматического логического вывода для решения конкретных задач, делая упор на формальный вывод, позволяющий извлекать новые знания из явно заданных в базе знаний.

## **2.1 Обоснование актуальности онтологического анализа для оценки технического состояния для конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений**

Раскрытие и моделирование механизмов памяти человека-эксперта, обеспечивающих хранение огромного объема информации, приобретаемой в течение жизни, а также быстрое и точное воспроизведение необходимой информации при проведении обследования строительного объекта имеет большое практическое значение для построения экспертной системы [20].

Именно в этом контексте мы сталкиваемся с понятием «репрезентация информации» в памяти человека. Репрезентация – это представление познаваемого явления с помощью: символов, моделей, в том числе языковых, логических и математических. Естественные и искусственные языки – главные посредники, репрезентанты.

Э. Тульвинг, исследовав проблемы памяти, выделил три основных вида памяти: эпизодическую, семантическую и процедурную [83]. Эпизодическая память хранит информацию о датированных во времени эпизодах или событиях. Семантическая память – это умственный тезаурус, который организует знания человека. Процедурная – низшая форма памяти сохраняет связи между стимулами и реакцией. Ее можно сравнить с тем, что называют ассоциативной памятью.

При построении базы знаний экспертной системы особое внимание уделяется репрезентации семантических отношений, как предписанию о выполнении определенных операций, реализация которых позволяет проверять наличие того или иного отношения.

Среди ряда научных гипотез, выдвигаемых для объяснения репрезентации знаний, большое практическое применение получили гипотезы репрезентации семантических отношений (специфических связей между репрезентациями понятий в памяти человека). Согласно репрезентации семантических отношений, в работе сделано предположение, что знания о техническом состоянии конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений имеют две формы хранения

в памяти опытного инженера-обследователя – процессуальную и декларативную [54]. Процессуальной формой называют рассмотрение знаний в виде предписаний о выполнении определенных операций, реализация которых позволяет проверять наличие того или иного отношения. Декларативная форма основана на предположении, что семантические отношения хранятся подобно понятиям, непосредственно в виде декларативной информации. Под знаниями при этом подразумевают основные закономерности в предметной области, позволяющие человеку решать конкретные задачи. Знания являются результатом развития концепции баз данных, преодолевающим конфликт нечеткой реальности со строгим формализованным описанием информации характерным для баз данных.

Достоверность оценки технического состояния конструкций эксплуатируемых зданий зависит не только от качества данных, полученных в ходе инженерного обследования, от эффективности используемых аналитических методов и алгоритмов, но и, как показывает практика оценки технического состояния строительных объектов, не в меньшей степени зависит от последовательности решений оценки, как многоуровневой задачи [84–86]. Фрагментарность и разрозненность декларативных знаний – одна из основных сложностей в оценке технического состояния строительной конструкции.

Специалисты-практики в сфере обследования и мониторинга строительных объектов, не имея четко определенной структуры решений поставленных задач, в первую очередь принимают во внимание объективные критерии, с которыми сопоставляют техническое состояние конструкции. Сложность существенно возрастает при учете обширного списка признаков технического состояния, которые содержатся в текущих нормативных стандартах. «Знания» по оценке технического состояния строительных конструкций не достаточно консолидированы и не располагают четкими стратегиями принятия решений. Отсутствует рассмотрение технического состояния конструкций с позиций закономерностей системного целого и взаимодействия ее составляющих частей, не уделено внимание иерархическому учету влияющих факторов. Все это



подчеркивает неготовность «знаний» из области диагностики строительных объектов к компьютерному применению. Таким образом, организация неформальной информации поступающей с этапов обследования для ее интерпретации во «внутреннем мире» ЭВМ является актуальной и исключительно важной задачей в создании интеллектуальных экспертных систем для этой практической деятельности.

Ценность любой экспертной системы как законченного продукта максимально определяется качеством созданной базы знаний. Для анализа результатов, необходимо обеспечить доведение данных, полученных в ходе обследования, до приемлемого уровня качества и информативности, а также правильно организовать алгоритм их обработки, обеспечивающий их целостность и гибкость выполнения аналитических запросов. Упрощение обработки значений многочисленных контролируемых параметров технических систем может быть достигнуто применением процедуры комплексного оценивания на основе иерархии критериев, в которых более частные показатели объединяются в агрегированные. Имеются способы автоматического генерирования иерархий на основе обучающей выборки [87, 88]. В связи с отсутствием необходимых выборок, организацию системы декларативных знаний о техническом состоянии конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений и целевое использование этих знаний в экспертных системах предлагается связать с методикой построения онтологий [89–106].

Онтология – это, одновременно, и способ представления знаний, включающий описание некоторой совокупности понятий, отношений между ними с аргументацией, и полученная в результате применения указанного способа к конкретной предметной области модель. Термин *онтология* заимствован из философии, где обозначает науку, описывающую формы бытия и то, как формы бытия относятся между собой.

Уже достаточно большое количество проектов в различных предметных областях используют онтологии в своих приложениях. В отличие от знаний, перенесенных в алгоритмы, онтология обеспечивает их унифицированное и

многократное использование разными группами исследователей или пользователей. Аналитическая процедура, выполняемая с целью выделения, объединения релевантных информационно-логических и функциональных аспектов исследуемой системы в соответствующей содержательной онтологии называется *онтологическим системным анализом* (или, сокращенно, *онтологическим анализом*) [96, 107].

Идея применения онтологического анализа в построении декларативной составляющей базы знаний экспертной системы для оценки технического состояния конструкций заключается в исследовании и интерпретации системных связей в изучаемой неформальной информации, разделении информации на классы, определении совокупности фундаментальных свойств и признаков этих классов. Техническое состояние предлагается рассматривать как множество более мелких подмножеств и, наоборот, признаки, факторы, аномалии – как элементы более высоких классов обобщений.

Онтологии обеспечат содействие структурированию, представлению логического обоснования и манипуляциям знаниями о техническом состоянии конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. Фундаментальным значением применения онтологического анализа является снижение влияния интуиции экспертов-аналитиков на процесс конструирования структуры понятий, включенных в оценку технического состояния конструкции.

Результат онтологического анализа – концептуальная модель предметных знаний в виде *онтографа* с описанием внутреннего содержимого используемых понятий [102]. Под *онтографом* понимается графическое представление многоуровневой иерархической структуры (системы) понятий. *Понятия* или, по-другому, часто употребляемые в онтологическом анализе, *концепты*, символизируют классы и подклассы декларативных знаний с механизмом наследования признаков-атрибутов, где каждый элемент характеризуется отличительными и унаследованными от нижестоящего класса признаками. Узлы (вершины) онтографа – понятия, соединяемые дугами, отображающими отношения между ними, как пути передачи и обработки информации.

## 2.2 Разработка концептуальной модели предметной области

### «Техническая диагностика строительных конструкций»

Онтологическое представление знаний предметной области используется для семантической интеграции информационных ресурсов, адекватной интерпретации содержания текстовых документов и поисковых запросов, представленных на естественном языке. Для технической диагностики строительных конструкций применена методика разработки *компьютерных онтологий*, предложенная в [102]. Под *компьютерной онтологией* понимается формальное выражение концептуальных знаний о предметной области, как декларативный информационный ресурс базы знаний интеллектуальной системы. Ее построение является специфичной формой человеческого мышления, представляемое тройкой:

$$O = \langle K, R, F \rangle, \quad (2.1)$$

где  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $n = \text{Card } K$  – конечное множество концептов (понятий) предметной области (ПО);  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_j, \dots, r_m\}$ ,  $R: k_1 \times k_2 \times \dots \times k_m$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $m = \text{card } R$  – конечное множество семантически значимых отношений между концептами ПО;  $F: K \times R$  – конечное множество функций интерпретации, заданных на концептах и/или отношениях.

*Понятие (концепт)* является обобщением некоторого класса по их специфическим признакам. Характеризуют понятия *объем* (класс обобщенных в понятии элементов) и *содержание* (совокупность отличительных признаков, с помощью которых возможно обобщение и выделение предметов в рассматриваемом *понятии*).

В разработке онтологий для оценки технического состояния конструкций выделены следующие этапы: предварительный системный анализ знаний; разработка фрагментов онтологий; объединение фрагментов онтологий в общую

онтологию технического состояния рассматриваемой конструкции. Онтология должна легко передавать смысл. Суждения, входящие в определения, формализуются на основе общепринятого аппарата в виде тождественно истинных логических аксиом. Формирование начального набора понятий онтологии следует назначать с обоснованием для удовлетворения требований предполагаемой совокупности решаемых задач. Ядро онтологии формируют первоначально введенные понятия и описывающие их аксиомы, при этом расширение онтологии должно происходить без пересмотра ее других элементов. Понятия онтологии должны отображать концептуальную структуру предметной области, стабильную на всем протяжении существования онтологической системы. Реализация принципов совместного использования онтологий предполагает спецификацию онтологий на уровне представления, а не символического кодирования.

### **2.2.1 Предварительный системный анализ знаний о техническом состоянии конструкции**

Строительные конструкции – сложные системы, характеризующиеся входными и выходными параметрами. Они состоят из множества взаимодействующих составляющих (подсистем), вследствие чего сложная система приобретает новые свойства. Методология исследования сложной системы основана на умозрительности и сведении целого к части. Значимость отдельных частей для целого не одинакова.

Почти всегда строительную конструкцию можно привести к модели, состоящей из нескольких более простых составляющих моделей, принадлежащих разным уровням иерархии [108]. Принцип исследования таких систем – принцип рекуррентного объяснения: свойства систем рассматриваемого уровня выводятся исходя из постулируемых свойств систем нижестоящего уровня. При каждом переходе на следующий иерархический уровень система рассматриваемого уровня становится элементом системы высшего уровня [109].

Этап системного анализа технического состояния рассматриваемой конструкции предполагает:

- систематизированное представление знаний о конструкции, понимания характера и условий ее работы, геометрических характеристик, расчетной схемы, конструктивных особенностей, применяемых строительных материалов;
- выявление существенных характеристик и свойств понятий (признаков, параметров) так или иначе связанных с оценкой технического состояния конструкции;
- разработку глоссария (словаря) терминов (понятий), входящих в оценку технического состояния конструкции.

Понятия включены в классы (группы) по семантической зависимости, с учетом следующих особенностей: отображение вида или рода элементов, части или целого; отображение свойства, абстрагированного от элемента.

На этапе предварительного системного анализа выполняется построение множеств  $K$ ,  $R$  и  $F$ .

### ***Построение множества $K$***

К построению множества  $K$  следует подобрать список терминов и определить их свойства. Необходимо: установить, чем является понятие, классом элементов или конкретным понятием; найти для каждого термина возможные существенные отношения с другими терминами из перечня; описать существенные свойства понятий. Из сформированного перечня терминов следует выбрать понятия, которые будут являть вершинами разрабатываемой онтологии. По типу отношений «ближе-дальше от цели» путем логического анализа производится расстановка выбранных понятий.

### ***Построение множества $R$***

При построении множества  $R$  для каждого элемента  $k_i \in K$  требуется установить семантическое отношение (лингвистическое смысловое отношение между словами)  $R_m$  с элементом  $k_j \in K$ ,  $k_i R_k k_j$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ,  $i \neq j$ ,  $k = \overline{1, m}$ , т. е. построить множество дуг, связывающих вершины онтографа. Вершины

онтографа могут быть терминальными и нетерминальными. Терминальные вершины – концепты (понятия), характеризующие конкретные контролируемые качественные и количественные параметры технического состояния конструкции. Нетерминальные – концепты, характеризующие группы (классы) информативных признаков.

### ***Построение множества $F$***

Построение функций интерпретации заключается в составлении глоссария – словаря используемых терминов, которые являются вершинами онтографа. Глоссарий составляется на этапе предварительного анализа и уточняется на последующих этапах.

## **2.2.2 Онтология категориального уровня (ОКУ)**

Определяющей характеристикой сложности представления технического состояния строительной конструкции, как объекта системного анализа, является многоаспектность и разнородность знаний, приобретенных путем частных и независимых исследований. На практике такие объекты изучают по частям, фрагментарно, с последующей интеграцией. Стыковка нескольких разработанных фрагментов в общую онтологию  $O$  технического состояния конструкции может быть осуществлена через понятия онтологии категориального уровня (ОКУ) [102]. Под *онтологией категориального уровня* понимается онтология, включающая в себя лишь несколько наиболее существенных понятий, полно характеризующих ее с позиции главной цели. При этом, понятия категориального уровня могут быть недоступны для прямого (без промежуточных понятий) семантического отношения, с понятиями, характеризующими непосредственно, например, измерения контролируемых параметров технического состояния конструкции.

Понятия  $O$ , связанные с понятиями ОКУ, являются их подклассами, наследуют признаки понятия класса, например отношения «род-вид». Перечень понятий, входящих в ОКУ, может быть составлен из понятий, входящих в

определения концептов верхнего уровня. Пополнение перечня осуществляется на основе профессиональных знаний разработчика (эксперта).

В ходе многочисленных экспериментов по построению онтографов технического состояния различных типов строительных конструкций (балок, колонн, плит), из разных видов материалов (древесины, железобетона, металла), разработан *шаблон*, предписывающий формирование онтологий категориального уровня, как принцип декомпозиции множеств контролируемых параметров технического состояния конструкций (рисунок 2.1). Шаблон предназначен для установления базовых понятий *ОКУ* и их ранжирования по следующим уровням:

**0-й уровень** – понятие «*Техническое состояние конструкции*», цель оценки состояния сложной системы;

**1-й уровень** – подклассы вышестоящего понятия 0-го уровня (технического состояния конструкции), представляющие собой концепты, ассоциирующиеся как с реальными, так и абстрактными *составляющими* (частями) конструкции. Перечень понятий первого уровня определен исходя из общепринятого порядка оценки *несущей способности* конструкций (по зонам, участкам, элементам) на основании анализа отношений между определением термина *механическая безопасность* и терминами *категорий технических состояний* (*нормативное, работоспособное, ограниченно работоспособное, аварийное состояния*). Сущность термина *несущая способность* находится в содержании *категорий технических состояний с механической безопасностью*.

**2-й уровень** – подклассы понятий 1-го уровня:

– оценка технического состояния, сделанная исходя из исследования признаков категорий технического состояния конструкции (оценка технического состояния по результатам обследования) и поверочных расчетов;

– оценка технического состояния, сделанная исходя из контроля соответствия установленных в ходе обследования характеристик конструкции конструктивным (например, оценка выполнения требований к размещению арматуры в сечении элемента, требований к классу бетона, стали для данного вида конструкции), эксплуатационным (требования к защитному покрытию

конструкции, требования к среде эксплуатации конструкции) и др. современным требованиям нормативно-технической документации;

**3-й уровень** – подклассы понятия 2-уровня, характеризующего оценку технического состояния по результатам обследования:

- оценка технического состояния, сделанная исходя из исследования признаков напряженного состояния элемента (визуальная оценка напряженного состояния);

- оценка (оценки) технического состояния, сделанная исходя из исследования признаков состояния материала (материалов) конструкции;

- оценка технического состояния, сделанная исходя из результатов поверочных расчетов с учетом выявленных дефектов и повреждений.

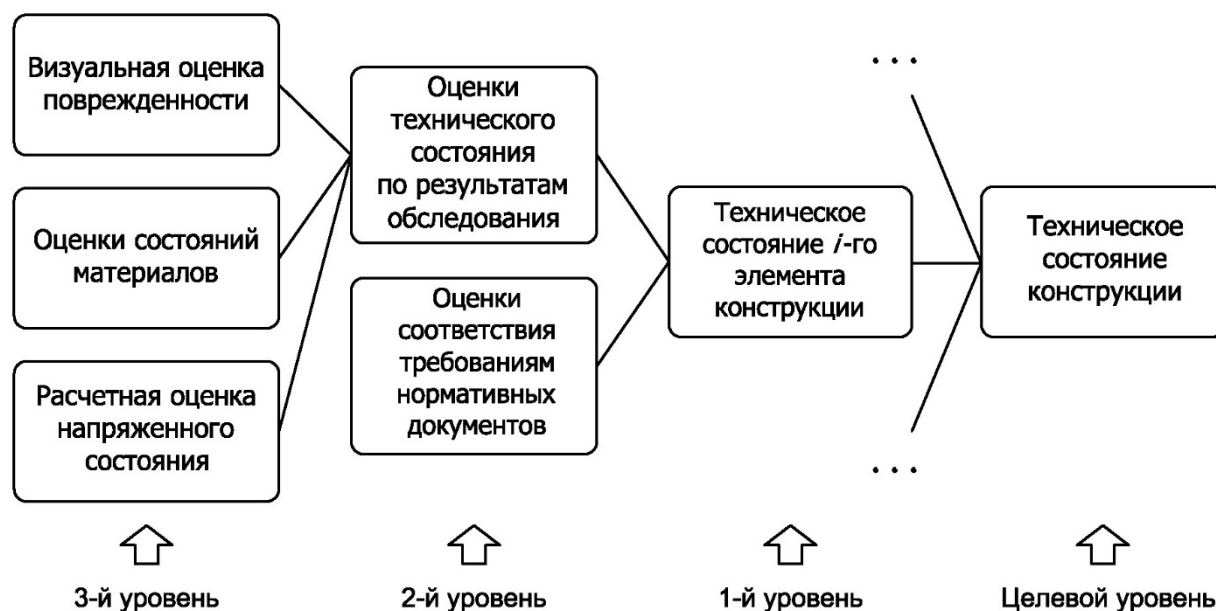


Рисунок 2.1 – Шаблон для разработки онтологий категориального уровня (ОКУ) технического состояния строительных конструкций

### 2.2.3 Индексация онтографа

При визуализации онтологии онтограф может занять значительный объем области его представления, затруднить восприятие отношений между понятиями и структуры знаний предметной области, что неизбежно снизит эффект от



применения онтологического анализа. В этих случаях применяют методики, направленные на повышение эффективности графического представления и выразительности онтографов [102].

Для визуального представления онтографа технического состояния конструкций в работе предусмотрена система обозначений и индексации, позволяющая сжать его визуальное представление. Обозначение каждого концепта отражает то, что он характеризует: класс, группу признаков (обозначение буквой  $y$ ) или конкретный входной контролируемый параметр (обозначение буквой  $x$ ). В индексе каждого концепта в удобочитаемой форме отражены его номер в перечне понятий, входящих в вышестоящий концепт-класс (последняя цифра в индексе), связь с этим вышестоящим концептом и принадлежность к классу концептов первого уровня (латинскими буквами, на конце индекса, например: « $sup$ »).

Рассмотрим обозначение некоторого концепта  $x_{12sup}$ . Здесь  $x$  – понятие, характеризующее входной контролируемый параметр; 2 (последняя цифра в индексе) – номер этого концепта в списке понятий, включенных в вышестоящий концепт-класс  $y_{1sup}$ . При этом  $y_{1sup}$  – концепт, является 1-м понятием в перечне понятий вышестоящего над ним концепта  $y_{sup}$ . В свою очередь  $y_{sup}$  – концепт, характеризующий техническое состояние составляющей зоны (конструкции), в данном примере – опоры, т.е. является понятием 1-го уровня онтологии, подклассом главной цели онтологии – понятия  $y$  (технического состояния всей конструкции).

### **2.3 Разработка онтологии технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций**

Возможности применения онтологического анализа к систематизации и консолидации знаний о техническом состоянии строительных конструкций в настоящей работе продемонстрированы на примере исследований по разработке онтологии «*Техническое состояние железобетонной изгибаемой конструкции*»

(балок, плит), положенной в основу декларативной составляющей базы знаний исследовательского прототипа экспертной системы. Выбор примера обусловлен следующими причинами:

- вопросы методики оценки железобетонных конструкций, имеющих значительное место в современном строительстве, всегда имели и имеют в настоящее время особую актуальность;
- практика обследования зданий и сооружений показывает, что на долю железобетонных конструкций массового строительства, как сборных, так и монолитных, приходится большое число всех аварийных состояний;
- в неофициальной статистике аварий по видам строительных конструкций первые строчки в разные годы всегда занимали балки, прогоны, перекрытия и покрытия (изгибаемые элементы).

Источниками информации для разработки онтологий технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций зданий и сооружений является существующий обширный перечень литературы. Это учебники и учебные пособия, научные публикации, руководства и нормативные документы, регламентирующие процедуры этой практической деятельности – результаты научных исследований, проведенные как отдельными авторами [11, 110–127], так и научно-исследовательскими коллективами [120, 128–134], а также эвристические знания привлекаемых к разработке экспертов.

Железобетонные балки и плиты – это обычно одноэлементные конструкции, загружаемые по всему пролету. Изгибающие моменты вызывают в сечениях балок и плит разноточные нормальные усилия, увеличивающиеся к крайним волокнам. Разнообразие этих типов элементов, встречаемых в обследовании строительных объектов, очень большое и пока не может быть полностью учтено единой программой обследования. Однако всегда присутствует *ряд параметров*, подлежащих обязательному контролю, *достаточно полно характеризующих техническое состояние конструкций* массового строительства.

В целях типизации понятий включаемых в онтологию, концепты, представляющие значения контролируемых параметров оценки (не имеющие

подклассов) в работе обозначены как *«Результат...»*. Например, *«Результат измерения остаточной площади сечения арматуры»*, *«Результат измерения толщины защитного слоя бетона»*, *«Результат поверочных расчетов»* и др. К понятиям-классам применены термины вида: *«Состояние...»*, *«Контроль...»* или *«Оценка...»* – то, что лучше по смыслу подходит к названию концепта. Например, *«Состояние арматуры»*, *«Состояние бетона»*, *«Контроль коррозии арматуры»*, *«Оценка соответствия требованиям к армированию»* и др.

Компактная форма графической интерпретации – индексированный онтограф онтологии *«Техническое состояние железобетонной изгибаемой конструкции»* представлен на рисунке 2.2.

Проведенный онтологический анализ знаний об оценке технического железобетонных изгибаемых конструкций позволил выполнить их «разметку» в терминах предложенного словаря. Представленный онтограф является декларативной составляющей базы знаний (информационной моделью), характеризующей отношения между контролируемыми параметрами технического состояния (входными переменными) и результатом оценки технического состояния (выходной переменной). Отмеченные понятия и указанные отношения между ними позволяют выстроить алгоритмы принятия решений в необходимой последовательности сформулировать процедурные правила. В построении математической модели принятия решений понятия будут рассматриваться как переменные.

Описание и построение (развитие) онтологии, рассмотренной в исследовании, может быть продолжено и дальше. Как отмечено в [102], онтологии не могут быть разработаны в «завершенном виде», но имеют возможность эволюционировать, совершенствуясь и расширяясь по мере присоединения новых знаний.

### 2.3.1 Выбор концептов 1-уровня ОКУ

Несущие железобетонные изгибаемые конструкции проектируют на основании расчетов по предельным состояниям, включающим предельные состояния первой группы (по полной непригодности к эксплуатации вследствие потери несущей способности) и второй группы (по непригодности к *нормальной* эксплуатации вследствие образования или чрезмерного раскрытия трещин, появления недопустимых деформаций) [135, 136].

Известно, что под воздействием внешней нагрузки изгибаемый железобетонный элемент может разрушиться как по *нормальному сечению*, в зоне действия наибольших изгибающих моментов, так и по *наклонному* к продольной оси элемента *сечению*, в зоне действия наибольших касательных напряжений [125]. При усилиях, близких к предельным значениям, возрастают неупругие деформации бетона и возможно возникновение пластических деформаций арматуры. Например, в статически определимых изгибаемых железобетонных конструкциях такое состояние характеризуется большими прогибами, свидетельствующими о приближении момента разрушения конструкции. Угроза выхода из работы (потери несущей способности) конструкции может возникнуть также в результате ухудшения условий *опирания* и недостаточного обеспечения устойчивости конструкции при усилиях в нормальных и наклонных сечениях меньше предельных. Это дает основания полагать, что разработка онтологии (*O*) технического состояния железобетонной изгибаемой конструкции, должна быть распределена по направлениям исследования зон действия основных разрушающих внутренних усилий, деформаций (величин прогибов), оценки узлов опирания, а также закладных и соединительных деталей (связей). Интеграция воспроизведенных онтологических знаний должна быть осуществлена при помощи онтологии категориального уровня (*ОКУ*).

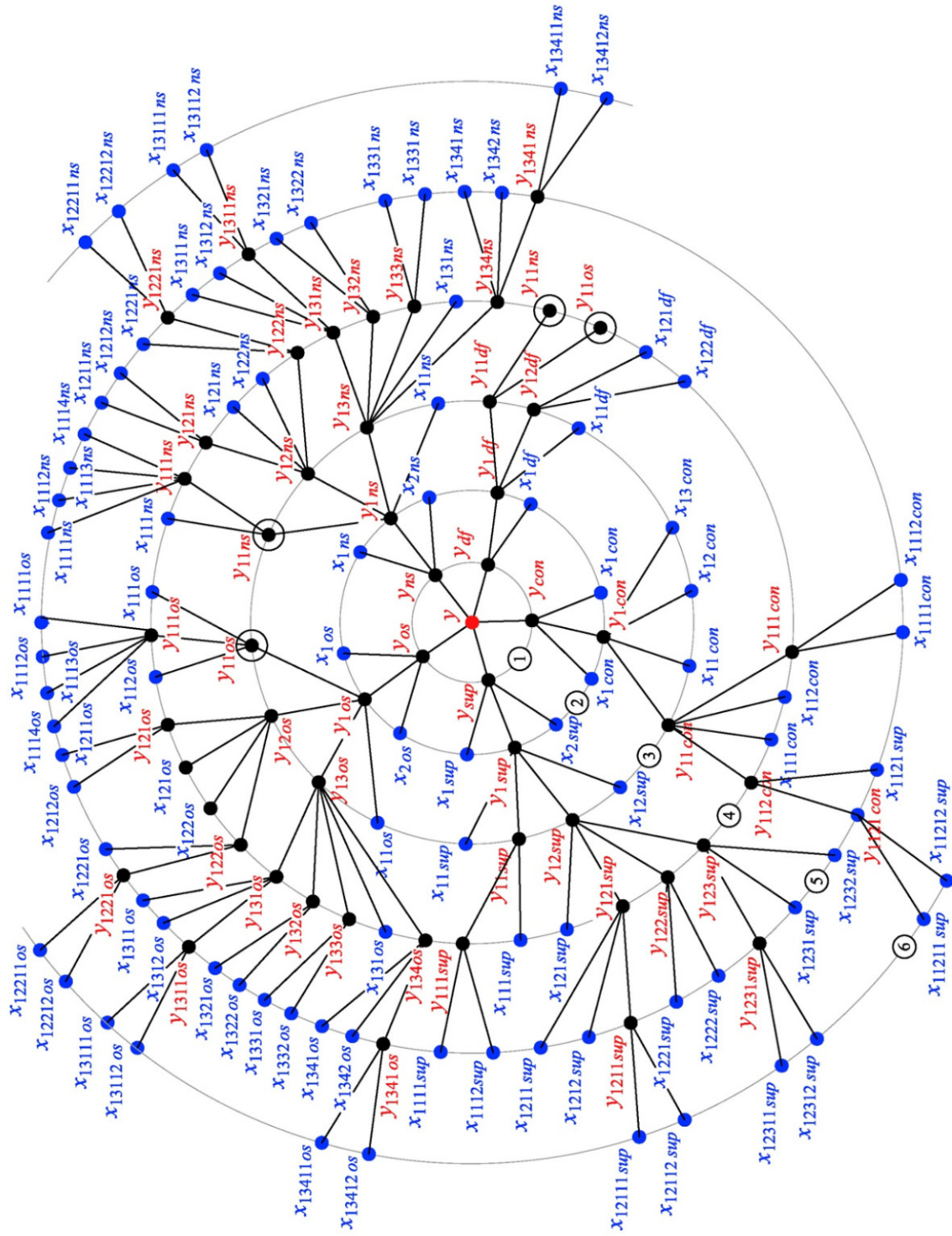


Рисунок 2.2 – Индексированный онтограф онтологии  
«Техническое состояние железобетонной изгибаемой конструкции»

Анализ, нормативно-технической документации и наиболее подверженных отказу частей изгибаемой железобетонной конструкции, показывает, что в перечень понятий первого уровня *ОКУ*, в качестве основных направлений моделирования рассуждений, следуют включить (рисунки 2.3, 2.4): «Состояние опор», «Состояние наклонных сечений», «Состояние нормальных сечений», «Состояние закладных деталей и связей», «Контроль жесткости»:

«Состояние опор» ( $y_{sup}$ ) – понятие, характеризующее техническое состояние опорной области (узла) конструкции, признаками которого являются количественные и качественные характеристики свойств материалов, поверочные расчеты и параметры конструктивного исполнения.

«Состояние наклонных сечений» ( $y_{os}$ ) – понятие, характеризующее техническое состояние наклонных сечений конструкции, зон возможного разрушения изгибаемого элемента по наклонным сечениям, признаками которого являются количественные и качественные характеристики свойств материалов, поверочные расчеты и параметры конструктивного исполнения.

«Состояние нормальных сечений» ( $y_{ns}$ ) – понятие, характеризующее техническое состояние нормальных сечений конструкции, зон возможного разрушения изгибаемого элемента по нормальным сечениям, признаками которого являются количественные и качественные характеристики свойств материалов, поверочные расчеты и параметры конструктивного исполнения.

«Состояние закладных деталей и связей» ( $y_{com}$ ) – понятие, характеризующее техническое состояние закладных и соединительных деталей (связей) конструкции, признаками которых являются количественные и качественные характеристики свойств материалов, поверочные расчеты и параметры конструктивного исполнения.

«Контроль жесткости» ( $y_{df}$ ) – понятие, характеризующее техническое состояние конструкции, признаками которого являются количественные и качественные характеристики и поверочные расчеты деформаций (прогибов).

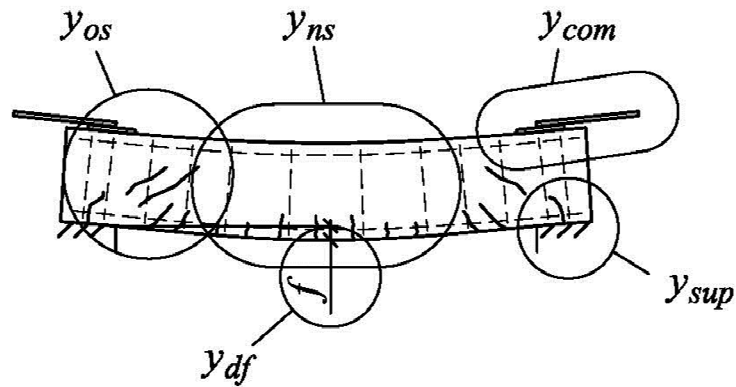


Рисунок 2.3 – Условное представление концептов 1-уровня *ОКУ* онтологии «Техническое состояние железобетонной изгибаемой конструкции»

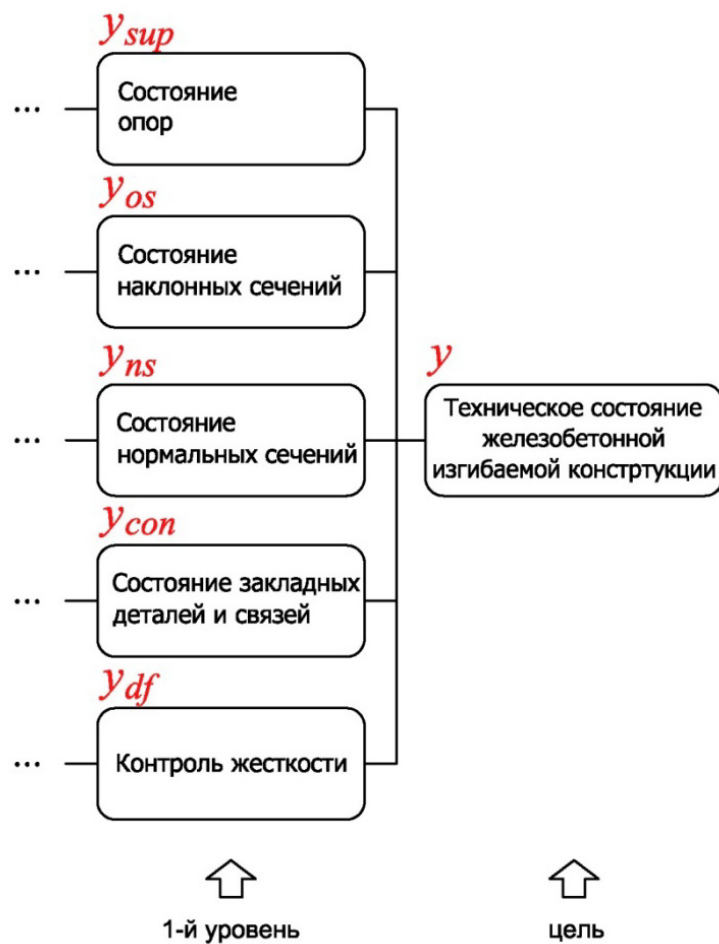


Рисунок 2.4 – Фрагмент онтографа онтологии «Техническое состояние железобетонной изгибаемой конструкции» с концептами 1-го уровня *ОКУ*

### 2.3.2 Выбор концептов 2-уровня ОКУ

При обследовании железобетонных конструкций необходимо проанализировать все дефекты и повреждения, свидетельствующие об изменении или влияющие на изменение напряженно-деформированного состояния конструкции (или ее части) и физико-механических характеристик материалов. Возникают ситуации, когда, с одной стороны, в ходе проверок может оказаться, что ни один из контролируемых параметров не может воспрепятствовать присвоению конструкции самой высокой степени эксплуатационной пригодности – нормативного технического состояния (несущая способность обеспечена, снижения прочности материалов не обнаружено, дефекты и повреждения отсутствуют и пр.) При этом, в ходе сравнения параметров системы армирования и характеристик материалов конструкции с современными нормативными требованиями, обнаруживаются отклонения. Например, превышение максимально допустимого шага поперечной арматуры или вообще ее отсутствие, выявление несоответствия класса бетона действующим нормам или несоответствие требованиям к его заполнителю. Очевидно, что с учетом выявляемых конструктивных недостатков, не приходится говорить о нормативном техническом состоянии. Решение таких коллизий обеспечивается следующими введенными понятиями 2-го уровня ОКУ (рисунок 2.5, рисунки А.1, А.2, А.3, А.4 в приложении А):

*«Состояние по результатам обследования»* – понятие, характеризующее техническое состояние составляющей (части) конструкции, признаками которой являются количественные и качественные характеристики напряженно-деформированного состояния, состояния материалов и поверочные расчеты.

*«Результат проверки соответствия требованиям к армированию»* – понятие, характеризующее техническое состояние составляющей (части) конструкции, исходя из анализа соответствия текущим требованиям нормативных документов к армированию железобетонных конструкций.

*«Результат проверки соответствия требованиям к материалам»* – понятие, характеризующее техническое состояние составляющей (части)



конструкции, исходя из анализа соответствия текущим требованиям государственных стандартов и технических условий к материалам несущих железобетонных конструкций.

*«Результат проверки соответствия требованиям к прогибу»* – понятие, характеризующее техническое состояние составляющей (элемента) конструкции, исходя из анализа соответствия текущим требованиям нормативных документов и технических условий к прогибам конструкции.

### **2.3.3 Выбор концептов 3-уровня ОКУ**

Фактическое состояние каждой части конструкции определяется ее напряженно-деформированным состоянием, в большой степени зависящим от механических свойств материалов. Механические свойства конструкций из железобетона, как из комплексного строительного материала, зависят от соответствующих свойств бетона и арматуры. Стадию напряженно-деформированного состояния части (области, сечения) конструкции можно оценить на основании реально установленных признаков (параметров), а также поверочными расчетами. Таким образом, в перечень понятий 3-го ОКУ уровня следует включить следующие концепты (рисунок 2.5, рисунки А.1, А.2, А.3, А.4 в приложении А):

*«Визуальная оценка поврежденности»* – понятие, характеризующее техническое состояние составляющей (части) конструкции, исходя из анализа количественных и качественных визуальных признаков напряженного состояния материалов, обнаруженных непосредственно при обследовании.

*«Состояние арматуры»* – понятие, характеризующее техническое состояние арматуры, исходя из анализа количественных и качественных признаков, обнаруженных непосредственно при обследовании.

*«Состояние бетона»* – понятие, характеризующее техническое состояние бетона, исходя из анализа количественных и качественных признаков, обнаруженных непосредственно при инженерном обследовании.

«Состояние материала детали» – понятие, характеризующее техническое состояние закладных и соединительных деталей, исходя из анализа количественных и качественных признаков, обнаруженных непосредственно при обследовании.

«Результат поверочных расчетов» – понятие, характеризующее техническое состояние составляющей (части) конструкции, исходя из аналитического способа определения ее напряженно-деформированного состояния (поверочных расчетов).

«Контроль прогиба» – абстрактное понятие, характеризующее техническое состояние конструкции, исходя количественных и качественных признаков деформаций, обнаруженных непосредственно при обследовании.

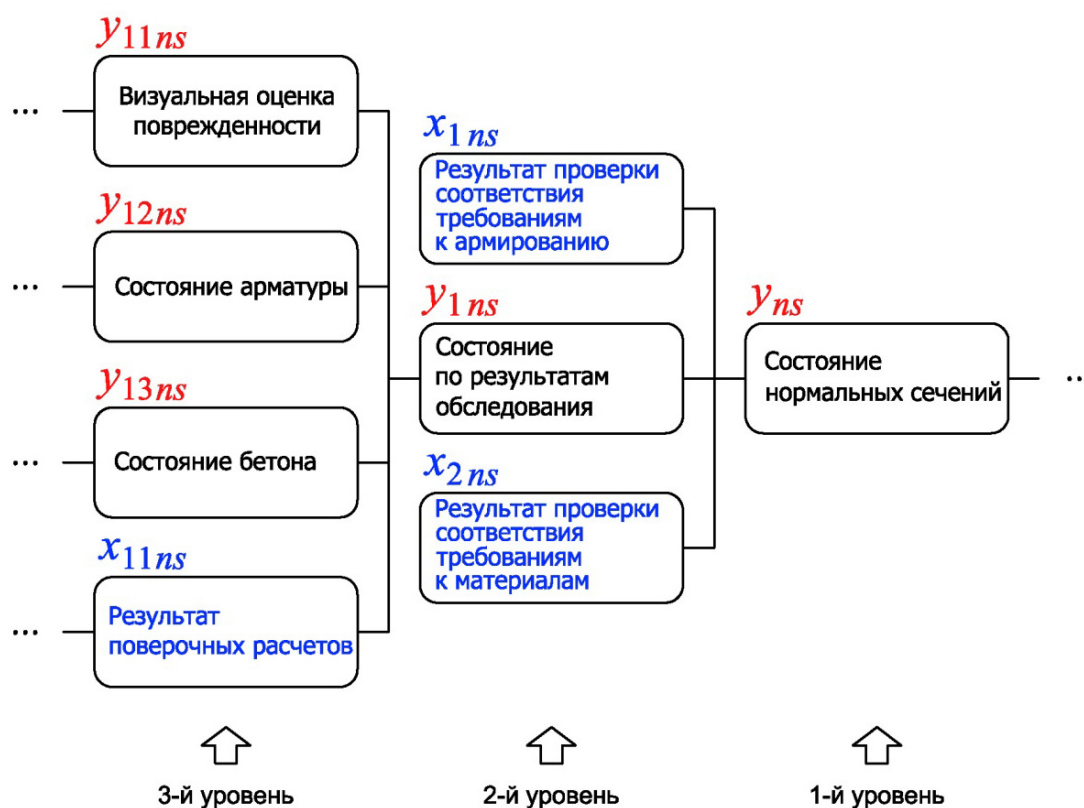


Рисунок 2.5 – Фрагмент онтографа онтологии категориального уровня

«Состояние нормальных сечений»

### 2.3.3.1 Концепт «Визуальная оценка поврежденности»

Напряжения, действующие в материалах строительных конструкций, преимущественно определяют аналитически (поверочными расчетами) и сравниваются с прочностными характеристиками материалов, определяемыми различными методами. Пока это не дает полной уверенности в определении фактического напряженно-деформированного состояния конструкций. Ввиду огромной трудоемкости и финансовых затрат, экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния применяется в исключительных случаях – в наиболее ответственных зданиях и сооружениях, для конструкций массового строительства не применяется.

Согласно нормам проектирования железобетонных конструкций, предельное состояние по прочности (разрушение сечения) может наступить в сечении изгибаемого элемента при достижении деформаций в наиболее сжатых волокнах предельных значений. Достижение предельной деформации бетона визуально проявляется в виде трещин, расположенных вдоль усилия сжатия, с образованием и отслоением мелких фрагментов бетона. Для выяснения фактического напряженно-деформированного состояния исследуемой части железобетонной конструкции информация может быть получена по результатам исследования признаков деформаций материалов. Например, разрушение сечения элемента в статически определимых изгибаемых элементах происходит при достижении напряжений в растянутой арматуре значений расчетных сопротивлений (физического или условного предела текучести).

Исследование силовых трещин на поверхности конструкции кроме измерения ширины раскрытия трещин на уровне арматуры, должно включать в себя определение расстояния между трещинами, а также учет класса арматуры, расположенной на уровне трещины [110, 112]. В специальной литературе последним двум параметрам уделено не достаточно внимания и потому некоторые обследователи, появление, например, наклонных трещин связывают с

аварийным состоянием, другие – пытаются сопоставить раскрытие силовых (нормальных и наклонных) трещин с граничным значением из условия сохранности арматуры, игнорируя тот факт, что трещина является показателем напряженного состояния конструкции.

Пренебрегая растяжимостью бетона, раскрытие, например, нормальных трещин может быть приравнено абсолютному удлинению арматуры на участке между трещинами [110]:

$$a_{crc,ult} = \varepsilon_{sm} l_{crc}, \quad (2.2)$$

где  $l_{crc}$  – расстояние между трещинами (рисунок 2.9);  $\varepsilon_{sm}$  – среднее значение относительной деформации арматуры на участке между трещинами.

$$\varepsilon_{sm} = \Psi_s \varepsilon_s, \quad (2.3)$$

где  $\Psi_s$  – отношение средних относительных деформаций на участке между трещинами к относительным деформациям арматуры в сечении с трещиной  $\varepsilon_s$ , ориентировочно принимаемое равным 0,9. Для арматуры, имеющей физический предел текучести, относительные деформации при достижении предела текучести можно принять в зависимости от класса, а именно: для класса А240 (А-I) – 0,0011, для класса А300 (А-II) – 0,0019, для класса А400 (А-III) – 0,0028, для класса арматуры А500 – 0,0030.

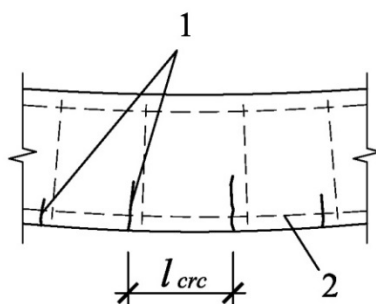


Рисунок 2.6 – К определению расстояния между нормальными трещинами:

1 – нормальные трещины, 2 – продольная арматура

При выяснении напряженного состояния наклонных сечений изгибаемого железобетонного элемента, необходимо учитывать, что наклонные трещины

располагаются под углом к оси поперечной арматуры. Поэтому значение ширины раскрытия трещин  $a_{crc}$  следует еще умножить на  $\sin \Theta$ , где  $\Theta$  – угол между наклонной трещиной и хомутом, рисунок 2.6 (или отгибом, что характерно для балок старой застройки). При этом за расстояние между наклонными трещинами принимается расстояние по перпендикуляру к оси элемента между двумя соседними трещинами или, если трещина одна, длина поперечного стержня (рисунок 2.7).

Ширину раскрытия наклонной трещины у свободной опоры более 0,5 мм с выходом на растянутую грань дает основания делать предположение о продергивании продольной арматуры.

Проведение системного онтологического анализа рассматриваемой предметной области для получения содержания концепта «Визуальная оценка поврежденности», с учетом принадлежности к соответствующей части разрабатываемой онтологии, позволили построить онтографы, представленные на рисунке 2.8, на рисунках А.5, А.6 в приложении А.

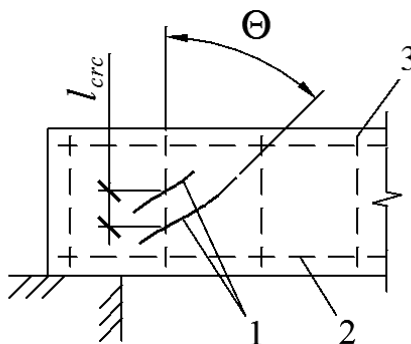


Рисунок 2.7 – К определению расстояния между наклонными трещинами и угла наклона трещин: 1 – наклонная трещина, 2 – продольная арматура, 3 – поперечная арматура

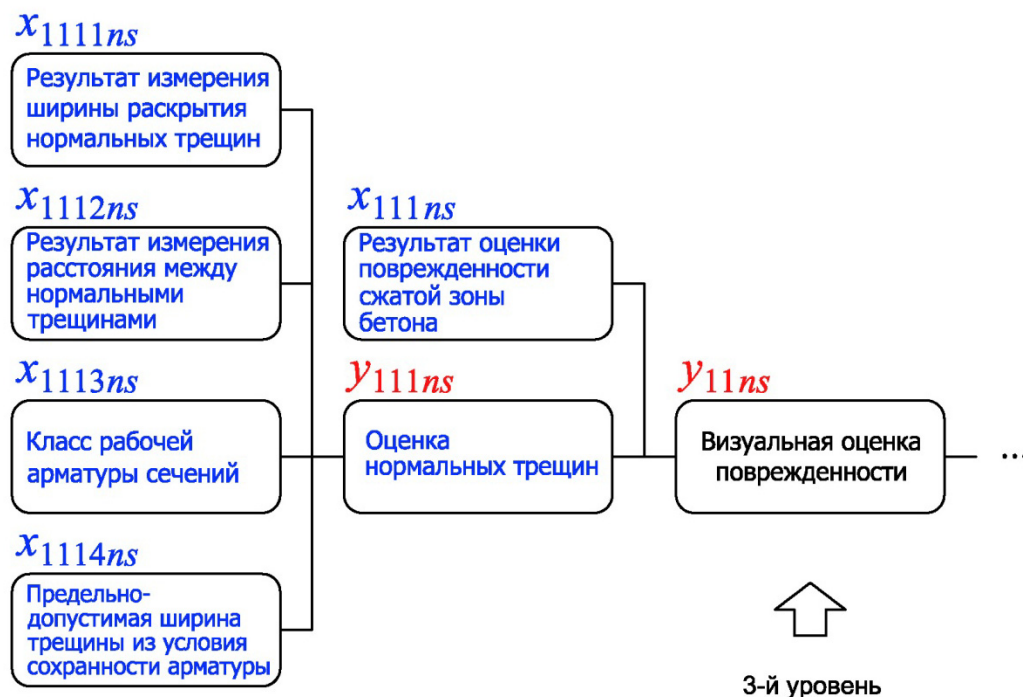


Рисунок 2.8 – Онтограф онтологии «Визуальная оценка поврежденности», как части содержимого онтологии «Состояние нормальных сечений»

### 2.3.3.2 Концепты «Состояние арматуры», «Состояние стали детали»

Арматура в железобетонных конструкциях устанавливается по функциональному назначению. Может быть рабочей, конструктивной (распределительной) или монтажной. Рабочая арматура является основной – для восприятия растягивающих усилий, реже – для усиления сжатого бетона, восприятия температурных и усадочных напряжений.

Стальные закладные и соединительные детали (связи) предусмотрены для обеспечения устойчивости, передачи усилий, пространственной жесткости, обеспечения надежности узлов опирания железобетонных конструкций. При повреждении этих конструктивных элементов снижается несущая способность, устойчивость, пространственная жесткость конструкции и здания в целом. Без видимых признаков перегрузки железобетонные конструкции с дефектами и повреждениями закладных деталей и связей могут находиться и в аварийном состоянии.

Определение состояния стальной арматуры, закладных и соединительных деталей железобетонных конструкций производят по следующим основным показателям: характеру коррозии, механическим повреждениям (разрывы, искривление), физико-механическим характеристикам. Отдельные виды дефектов и повреждений арматуры, закладных деталей и связей (в зависимости от степени развития дефекта или повреждения) могут быть выявлены визуально, другие – только в процессе инструментального обследования.

Коррозия арматуры ухудшает характеристики работоспособности конструкции, среди которых: нарушение совместной работы арматурных стержней с бетоном; разрушение защитного слоя бетона продуктами коррозии; уменьшение расчетной площади сечения арматуры со снижением несущей способности конструкции [119]. Продукты коррозии, образуемые при окислении стальной арматуры, увеличивают объем арматурных стержней, вызывают «внутреннее» давление и приводят к разрушению бетона вокруг арматуры.

Повреждение арматуры коррозией в бетоне может иметь характер локального и обширного поражения, неравномерного или равномерного уменьшения сечения по всей поверхности арматурных стержней. В области оценки повреждений арматуры коррозией перечень методов исследований ограничен. Наиболее надежным и доступным на данный момент остается выборочное вскрытие защитного слоя бетона конструкции с визуальной оценкой состояния и измерениями площади сечения арматурных стержней. Степень ослабления площади сечения арматурных стержней коррозией (%) оценивается из выражения [123]:

$$k_d = \frac{(d_o^2 - d_k^2) \cdot 100}{d_o^2}, \quad (2.4)$$

где  $d_o$  – исходный диаметр, мм;  $d_k$  – определяется по формуле:

$$d_k = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} d_i}{n} - t_{0,95} \cdot \frac{S_{dk}}{\sqrt{n}}, \quad (2.5)$$

где  $d_i$  – выборочное значение диаметра, мм;  $n$  – объем выборки (как правило не менее 30);  $S_{dk}$  – среднее квадратичное значение диаметра арматуры, см;  $t_{0,95}$  – коэффициент Стьюдента.

Состояние несущей способности стальных закладных и соединительных деталей оценивают также по отношению сечения металла после очистки от ржавчины к проектному сечению. При обследовании фиксируют язвенную коррозию (наличие язв, пластинчатой коррозии), наличие и состояние сварных швов. Для контроля коррозии арматуры закладных и соединительных деталей (связей) необходима не только количественная оценка коррозионного поражения, но и освидетельствование их поверхности (осмотр).

В результате механических ударов по поверхности конструкции возможны *механические повреждения арматуры и связей* в виде деформаций, искривлений, уменьшения размеров поперечного сечения или разрыва. При этом искривление даже одного арматурного стержня может вызвать снижение значения предельного для него усилия.

Поверхностные слои, включая арматуру, закладные и соединительные детали железобетонных элементов, как и всех видов конструкций под действием высоких температур при пожаре существенно изменяют свои физико-механические свойства. Поведение стальной арматуры при нагреве зависит от типа стали, величины напряжений, на которые она была рассчитана при нормальной температуре, а также способа ее производства. Например, после прогрева арматуры класса А400 до температуры 650 °С прочность снижается не менее чем на 5 %, при 700 °С – на 10 %, свыше 800 °С – на 15 %. При этом, снижение модуля упругости стали происходит при меньших значениях температуры – при 550 °С модуль упругости стали снижается на 40...60 % [137], возрастают температурные деформации, изгибаемые элементы могут получить недопустимые прогибы и чрезмерное раскрытие трещин.

Проведение системного онтологического анализа рассматриваемой предметной области для получения содержания концептов «Состояние арматуры» и «Состояние материалов детали», с учетом принадлежности к



соответствующей части разрабатываемой онтологии, позволили построить онтографы, представленные на рисунке 2.9 и на рисунках А.7, А.8, А.9 в приложении А.



Рисунок 2.9 – Фрагмент онтографа онтологии «Состояние арматуры», как части содержимого онтологии «Состояние нормальных сечений»

### 2.3.3.3 Концепт «Состояние бетона»

Для изготовления несущих конструкций зданий и сооружений широко применяется тяжелый бетон на цементном вяжущем и крупном плотном заполнителе из песчаника, гранита, диабазы и других материалов со средней плотностью 2200...2500 кг/м<sup>3</sup>. Важнейшая роль бетона – восприятие сжимающих усилий, совместная работа с арматурой и ее защита. Механические свойства бетона зависят факторов, определяющих строение его неоднородной искусственной структуры: качество цемента, характеристики заполнителя, состав бетона, водоцементное отношение, способ приготовления, укладки, обработки и др. Основная механическая характеристика бетона – мера его прочности.

Нарушение структуры бетона, вызванное внешними воздействиями, а также развитием в нем различных деструктивных процессов ведет к снижению его прочности и, соответственно, несущей способности части или всей конструкции.

К основным дефектам и повреждениям бетона, снижающих его прочность и эксплуатационные характеристики так же относят: нарушение толщины защитного слоя, коррозию, механические повреждения от нарушения правил эксплуатации, а так же последствия огневого воздействия [129].

Определение прочностных характеристик бетона имеет ряд методических проблем. Наиболее достоверные результаты определения прочности бетона возможны только при использовании разрушающих методов – выбуренных из конструкции кернов и стандартных образцов. Однако возможности их применения крайне ограничены и в некоторых случаях технически нереальны, ввиду высокой вероятности нанесения серьезных повреждений обследуемой конструкции. В подавляющем большинстве детальных инженерных обследований железобетонных конструкций прочность бетона определяется методами неразрушающего контроля, с помощью которых бетон не разрушают, а применяют другие воздействия. К таким воздействиям относятся: локальный удар, вдавливание другого, более твердого тела, распространение ультразвука. Ввиду присутствия неопределенности фиксируемых параметров, связанной с приборной составляющей погрешности, качеством обработки поверхности материала [8–10, 119] наличием дефектов в зоне измерений, напряженного состояния конструкции, неравномерной прочностью материала, для оценки прочности бетона необходим некий синтез результатов неразрушающего контроля и упрощенного метода исследования – простукивание с помощью молотка и зубила [117, 129, 131]. Наличие глухого звука при этом будет свидетельствовать о том, что повреждение имеет не только поверхностный характер, но и распространяется по сечению.

При обследовании технического состояния железобетонных конструкций оценка влияния агрессии внешней среды в бетоне находится в центре внимания. В бетоне возможно развитие физико-химических (коррозия бетона) и физико-

механических (периодическое замораживание и оттаивание, воздействие производственных масел и нефтепродуктов) деструктивных процессов.

Процессы коррозии бетона очень сложны и разнообразны. Различают три вида коррозии [127, 129]. Одним из наиболее распространенных процессов коррозии I вида является разрушение компонентов цементного камня (выщелачивание), вызванное фильтрацией мягкой воды сквозь бетон. Установлена связь выщелачивания извести из бетона со снижением его прочности. Так, выщелачивание 16 % извести из бетона приводит к снижению его прочности примерно на 20 %, а при выщелачивании в 30% – прочность снижается на 50 % [126].

Бетон хорошо впитывает углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), кислород и влагу, присутствующее в атмосфере, что предрасполагает возникновение углекислотной коррозии (относится к коррозии бетона II типа). При высокой концентрации  $\text{CO}_2$ , углекислота реагирует с карбонатом, превращая его в легкорастворимый бикарбонат, вымываемый из бетона при фильтрации агрессивной воды, существенно снижая его прочность. В эксплуатируемых конструкциях развитие коррозии бетона может быть оценено по результатам анализа продуктов фильтрации – по обнаружению в фильтрате бикарбоната  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . Кроме этого, проникновение в бетон углекислого газа вызывает коррозию вблизи расположенной арматуры. Поэтому для оценки работы арматуры, обеспечения пассивности арматуры в условиях агрессивной по отношению к бетону среды [124], необходимо контролировать величину защитного слоя бетона.

При оценке повреждений защитного слоя бетона следует учитывать и их площадь, поскольку его роль заключается не только в защите арматуры, но и для обеспечения ее совместной работы с бетоном конструкции. Стоит также отметить, что в концепции расчета железобетонных конструкций минимальные значения толщины защитного слоя установлены из предположения защитного действия на арматуру щелочной среды бетона на протяжении срока службы конструкции [136].

Часто при обследовании промышленных строительных объектов приходится оценивать последствия воздействия производственных масел и нефтепродуктов на железобетонные конструкции. Минеральные масла изменяют прочностные характеристики и некоторые другие свойства бетона и железобетона. Поверхностно-активные вещества, содержащиеся в производственных маслах, попадая в микродефекты бетона, вызывают адсорбционное понижение его прочности, оказывая при этом расклинивающее воздействие [112]. Промасливание бетона должно быть учтено в анализе прочности бетона конструкции, параллельно результатами инструментального контроля.

Н.М. Васильевым были предложены эмпирические зависимости, учитывающие начальную прочность бетона, общее время и режим попадания минеральных масел [122]:

$$R_t^M = R_0(1 - 0,1t), \quad (2.6)$$

где  $t$  – продолжительность воздействия минеральных масел на бетон, годы;  $R_0$  – первоначальная прочность бетона, МПа; 0,1 – коэффициент, показывающий интенсивность снижения прочности во времени при обильном попадании масла на бетон. Если время пропитки более 7-8 лет, прочность бетона принимается равной 1/3 от первоначальной.

Прочность бетона при периодическом попадании (1-2 раза в год) масел на конструкцию следует подсчитывать по формуле:

$$R_t^M = R_0(1 - 0,023t). \quad (2.7)$$

Указанная формула предназначена для учета воздействий масел на бетон, происходящих в течение 25-30 лет. В случаях превышающих указанные сроки, рекомендуется принимать не более 1/3 от первоначального (проектного) значения.

При пожаре бетон меняет прочностные и деформативные характеристики, меняется структура, утрачиваются защитные свойства к заключенной в нем арматуре. Снижение прочности бетона зависит от температуры нагрева, формы и

размеров сечения конструкции, местоположения конструкции по отношению к очагу пожара, длительности огневого воздействия, вида бетона и условий твердения. Например, после нагрева бетона на силикатном заполнителе до температуры 300 °С прочность может снизиться на 10 %, до температуры 400 °С – на 20 %, после нагрева бетона до температуры 500 °С прочность снижается на 30 % и более [133]. Температура нагрева бетона может быть вычислена и ориентировочно оценена по состоянию поверхности – по цвету бетона и ширине раскрытия температурно-усадочных трещин [112, 115, 123, 129, 134].

Проведение системного онтологического анализа рассматриваемой предметной области для получения содержания концепта «*Состояние бетона*», с учетом принадлежности к соответствующей части разрабатываемой онтологии, позволили построить онтографы, представленные на рисунке 2.10, на рисунках А.10, А.11 в приложении А.

#### 2.3.3.4 Концепт «Результат поверочных расчетов»

Поверочные расчеты являются неотъемлемой частью детального обследования конструкций [5]. Поверочный расчет конструкции является фактором уверенности в достоверности получаемых количественных и качественных контролируемых параметров конструкции при обследовании. Он может позволить выявить причины изменения состояния конструкций или, наоборот, подтвердить последствия влияния негативных факторов. В некоторых случаях результаты поверочных расчетов вступают в противоречие с признаками наблюдаемого состояния конструкции. Оценка снижения несущей способности часто сопряжена с большими трудностями, обусловленными неоднозначностью повреждений, прочностных показателей материалов, условности расчетных схем и несовершенств методов расчета.

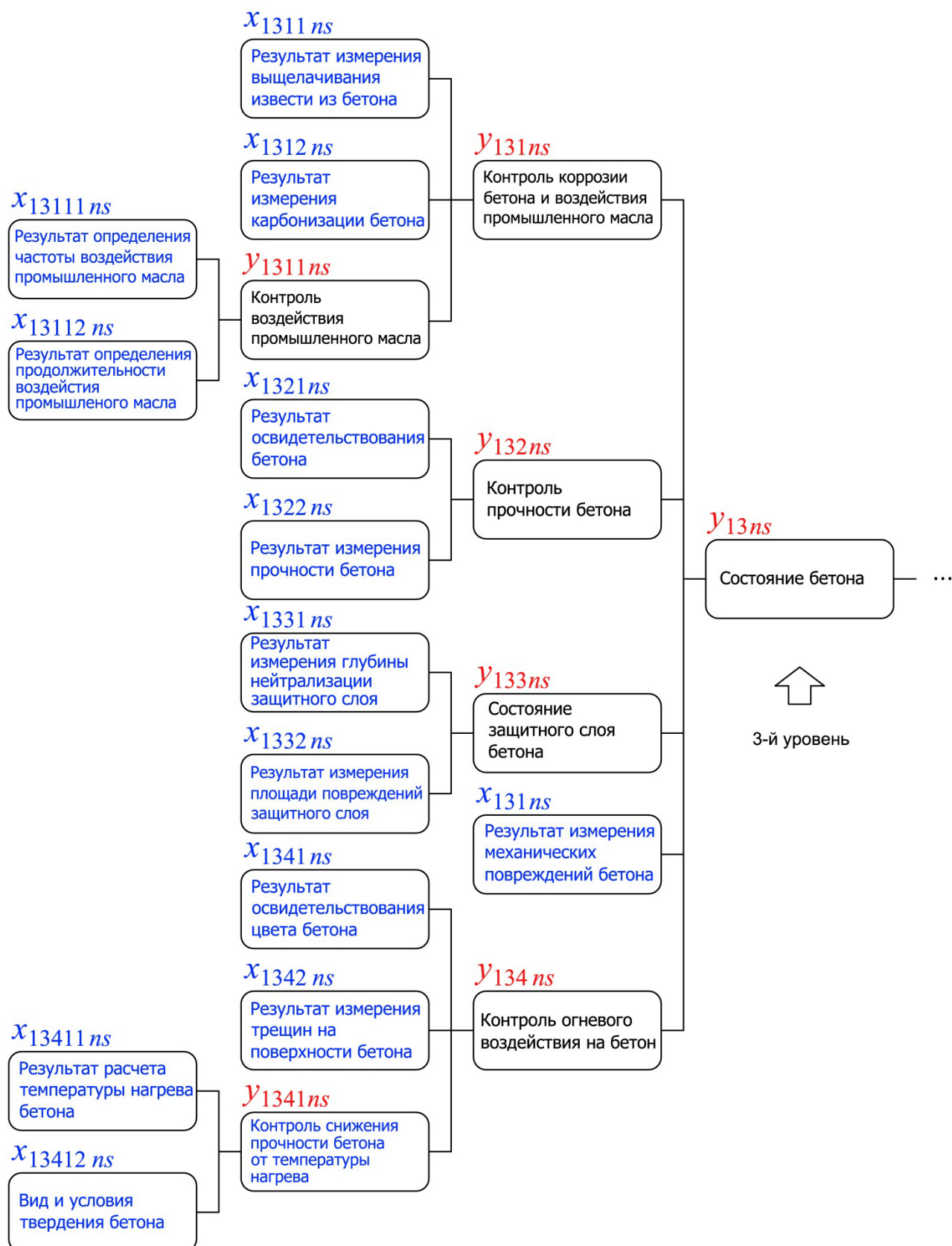


Рисунок 2.10 – Фрагмент онтографа онтологии «Состояние бетона», как части содержимого онтологии «Состояние нормальных сечений»

В настоящее время, согласно [125, 135, 136], расчет строительных конструкций производится по методу предельных состояний, дифференцированно учитывающему изменчивость нагрузок и сопротивления материалов. Ретроспективный анализ позволил установить, что параметры безопасности были заданы не достаточно обоснованно, ввиду отсутствия статистических данных (особенно для железобетонных конструкций), а также для снижения отличия от результатов проектирования по ранее применяемым методикам расчета. Запись неравенства, характеризующего условие обеспечения несущей способности конструкции, менялась неоднократно, но его общий вид остается неизменным:

$$F \leq F_u, \quad (2.8)$$

где  $F$  – расчетное значение усилия;  $F_u$  – теоретическая несущая способность сечения элемента.

В настоящее время, условие (2.8) имеет следующую подробную форму записи правой части неравенства:

$$F \leq F_u (S, R_{bn}, \gamma_b^{-1}, \gamma_{bi}, R_{sn}, \gamma_s^{-1}, \gamma_{si}), \quad (2.9)$$

где  $S$  – фактические геометрические характеристики сечения;

$R_{bn}, R_{sn}$  – нормативные сопротивления бетона и арматуры;  $\gamma_b, \gamma_s$  – коэффициенты надежности по бетону и арматуре;  $\gamma_{bi}, \gamma_{si}$  – коэффициенты условий работы бетона и арматуры.

За прошедшее время, в ходе корректировок норм по расчету железобетонных конструкций, базовой проектной характеристикой материалов стало нормативное сопротивление, гарантированное производителем с обеспеченностью 0,95. Однако надежность оценивается по-прежнему грубо, по аналогии с коэффициентами запаса в методе разрушающих нагрузок. Поэтому запас несущей способности конструкций оказывается довольно большим (в рамках данной работы несколько не опровергает его необходимость) и изменяется при рассмотрении железобетонных конструкций довольно в широких

пределах – от 25 % для слабо армированных изгибаемых конструкций до 60 % для центрально нагруженных колонн [11].

Результаты расчета по фактическим характеристикам материалов, размерам сечений и фактической расчетной схеме зависят от того, по каким нормам проектирования производится поверочный расчет. К примеру, несущая способность наклонных сечений железобетонных изгибаемых элементов, запроектированных по нормам 1962 года [138], оказывается в некоторых случаях не совсем достаточной при проверке по действующим нормам, особенно конструкций, изготовленных из бетонов высоких классов [123]. Расчетные величины нагрузок (снег, пыль, ветер) во многих случаях превосходят соответствующие величины нагрузок по нормам прежних лет. На практике обследования конструкций ситуация является типовой и в случаях, когда конструкции, запроектированные по старым нормам, в общем случае работают в эксплуатации не хуже конструкций, запроектированных по действующим нормам.

При проведении поверочных расчетов эксплуатируемых конструкций имеются возможности получить более полную информацию о работе конструкции, чем при проектировании. Поэтому некоторые специалисты склоняются к использованию при обследовании железобетонных конструкций других значений коэффициентов безопасности. Для решения этой проблемы пока нет единого мнения и эффективной методологии. «Однозначный» подход в принятии решения, например в случае, «если в результате поверочного расчета по современным нормам не удовлетворяется хотя бы одно из требований предельных состояний, то ее состояние не выше, чем ограничено работоспособное», оказывается наиболее легким, однако приводит к неверным выводам о причинах ухудшения технического состояния и необоснованному усилению. Тем более неприемлем и подход, содержащий полнейшую уверенность в безаварийности конструкций, несмотря на неудовлетворительные результаты поверочных расчетов, часто основанную на постулате «никуда не денется, столько стояла» [139]. Необходимо учитывать, что отсутствие проблем у конструкций, запроектированных по ранее действовавшим нормам, может быть связано с



наличием положительных факторов, неучтенных при проектировании и изготовлении.

Разработка онтологий, включающих понятия, характеризующие поверочные расчеты, является весьма сложной задачей и требует специального исследования. Очевидно, что перечень понятий входящих в этот концепт будет определяться видом расчета, необходимым для оценки технического состояния конкретной части конструкции. В диссертационном исследовании поверочные рассмотрены как отдельные (не классы) понятия, характеризующие контролируемый параметр *«Результат поверочных расчетов»* в составе соответствующих подсистем онтологии.

#### 2.3.3.5 Концепт *«Контроль прогиба»*

Развитие прогибов в железобетонных конструкциях свидетельствует о снижении жесткости конструкции. Причинами, вызывающими большие прогибы, являются: перегрузка конструкции (превышение расчетных значений внешней нагрузки); некачественно выполненные работы по армированию конструкции (смещение арматуры относительно проектного положения); неравномерность натяжения напряженно-армированных конструкций; применение опалубки недостаточной жесткости.

Прогибы несущих железобетонных изгибаемых конструкций ограничивают предельными значениями при проектировании исходя из второй группы предельных состояний в соответствии с технологическими, конструктивными, физиологическими и эстетико-психологическими требованиями. При этом прогибы конструкции эксплуатируемых зданий могут также сигнализировать и о снижении несущей способности. В литературных источниках неоднозначно трактуются количественные показатели этого признака. По одним данным состояние следует считать аварийным, если относительный прогиб, превышает  $1/150$ , по другим данным – если относительный прогиб превышает  $1/50$ . Имеются теоретические исследования, которые указывают, недопустимое снижение

несущей способности может происходить даже при значениях относительных прогибов меньше  $1/150$ , а «переход» железобетонной конструкции в аварийное состояние может быть определен по значениям относительного прогиба, соответствующего достижению предельного состояния по прочности [110].

Наличие прогибов, в зависимости от степени развития прогиба, может быть выявлено визуально: по характерным дефектам и повреждениям, указывающим на развитие прогиба; в сравнении с прогибами смежных конструкций. Однако с целью определения степени опасности данного признака должно быть проведено инструментальное определение величины прогиба конструкции (рисунок 2.11).

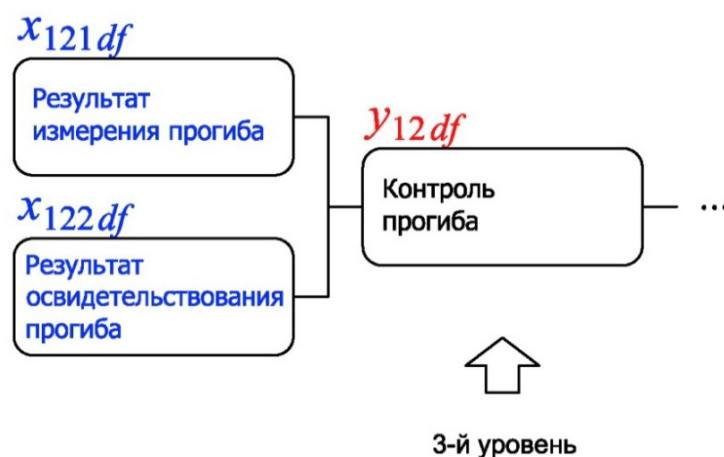


Рисунок 2.11 – Фрагмент онтографа онтологии «Контроль прогиба», как части содержимого онтологии «Контроль жесткости»

## 2.4 Выводы по главе 2

К разработке моделей декларативных знаний для оценки технического состояния строительных конструкций (для обеспечения эффективности принятия решений разрабатываемых экспертных систем) применен системный онтологический анализ. Разработана методика построения онтологий для обеспечения совместного использования знаний об оценке технического состояния конструкций в вычислительных экспериментах. Разработан *шаблон*, предписывающий формирование онтологий категориального уровня, как принцип декомпозиции контролируемых параметров технического состояния конструкций.

Исследование теоретических и прикладных аспектов системной интеграции знаний в области оценки технического состояния конструкций эксплуатируемых знаний и сооружений с помощью онтологического анализа на примере железобетонных изгибаемых конструкций позволяет сделать следующие выводы:

- Структура знаний оценки технического состояния строительной конструкции может рассматриваться с нескольких позиций, характеризующих как части конструкции (реальные и абстрактные), так и свойства каждой из них. В этом проявляется множественность структурной организации (полиструктурность) знаний оценки состояния строительных конструкций.

- Структура знаний оценки технического состояния строительной конструкции является *многоуровневой иерархической системой*, которая в зависимости от условий работы, материалов конструкций и конструктивных особенностей нуждается в выделении различных уровней иерархии.

- Полиструктурность и иерархичность рассматриваемых знаний указывают на то, что оценка технического состояния конструкций является подходящим объектом для системного онтологического анализа.

- Опыт применения онтологического анализа для ранжирования терминов и понятий оценки технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций (в том числе разработанный в исследовании шаблон для построения онтологий категориального уровня) позволяют рекомендовать предложенную концепцию как системную основу для разработки концептуальных моделей представления знаний о техническом состоянии конструкций всех типов из существующих видов материалов.

- Понятийные модели онтологий для оценки технического состояний конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений позволят формировать новые суждения в решениях практических задач, определять их сходства, а также производить интерпретацию вычислительного характера.

### **3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

При диагностике состояния строительного объекта эксперты часто пользуются приближенными оценками параметров, которые нельзя интерпретировать как полностью истинные или полностью ложные. Ответы эксперта на вопросы о предпочтении факторов, влияющих на оценку технического состояния конструкции, их количестве и взаимосвязи в значительной степени являются субъективными. Поэтому наиболее эффективные решения задач, содержащих размытость и неточность, можно получить с применением математического аппарата теории нечетких множеств и нечеткой логики, предложенного Л. Заде в 1965 г, который дает возможность учитывать разброс индивидуальных мнений.

Применение нечетких величин и лингвистических переменных, описание простых отношения между переменными с помощью нечетких высказываний, а сложных – нечеткими алгоритмами, позволяет указанному подходу характеризовать состояния систем любой сложности. Их теоретическая основа в математическом смысле является весьма точной и строгой. Точность получаемых результатов может регулироваться в соответствии с требованиями задач и точностью входных данных.

#### **3.1. Основные положения теории нечетких множеств, используемые в построении моделей идентификации категории технического состояния строительных конструкций**

Теория нечетких множеств позволяет формализовать и обрабатывать самую разнородную информацию, содержащуюся в описании признаков технического состояния конструкций, моделировать слабо формализуемые рассуждения, такие

как: «много», «мало», «часто», «редко», «около ...», «приблизительно ...», «не менее ...», «не более ...», «в диапазоне от ... до ...» и др. Существуют знания, достоверность которых выражается некоторым коэффициентом, например, 0,8 или 0,5. Информацию из предметной области технической диагностики зданий и сооружений необходимо формализовать в терминах нечетких множеств.

**Нечетким множеством**  $\tilde{A}$  на универсальном множестве  $X$  называется совокупность пар  $(\mu_A(x), x)$ , где  $\mu_A(x)$  – степень принадлежности элемента  $x \in X$  к нечеткому множеству  $\tilde{A}$ . Под **универсальным множеством** (*универсум*) понимается множество, включающее в себя все объекты в рассматриваемой в задаче [38], [40]. Как показали исследования, признак, атрибут, свойства элементов строительных конструкций удобно характеризовать нечетким множеством.

**Степень принадлежности** – число из диапазона  $[0, 1]$ . Чем выше степень принадлежности, тем в большей мере признак технического состояния (значение контролируемого параметра) соответствует рассматриваемому техническому состоянию.

По аналогии с классическими множествами рассматриваемое свойство может порождать некоторый предикат, который называют *нечетким предикатом* (то, что утверждается о субъекте), который может принимать целый континуум значений истинности (а не одно из двух значений: «истина» или «ложь»), которые для удобства выбираются из интервала  $[0, 1]$ . При этом значению «истина» соответствует число 1, а значению «ложь» – 0 (см. рисунок 3.1).

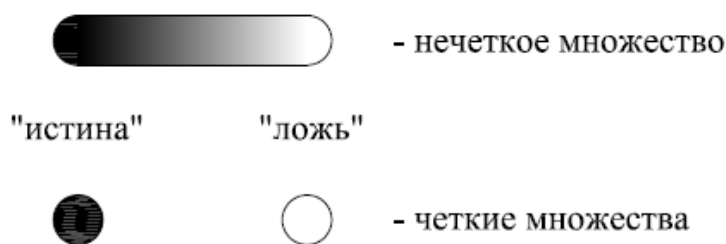


Рисунок 3.1 – Нечеткие и четкие множества

Нечеткое множество признаков технического состояния конструкций может быть *непрерывным* или *дискретным*. Универсальное множество, состоящее из конечного количества элементов (классов), что характерно для измерения качественных признаков технического состояния,  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$  записывается в виде:

$$\tilde{A} = \sum_{i=1}^k \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \text{ или } \tilde{A} = \left( \frac{\mu_A(x_1)}{x_1}, \frac{\mu_A(x_2)}{x_2}, \dots, \frac{\mu_A(x_k)}{x_k} \right). \quad (3.1)$$

Для обозначения непрерывного множества для количественных контролируемых параметров технического состояния использовано обозначение вида:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \frac{\mu_A(x)}{x}. \quad (3.2)$$

Знаки  $\sum$  и  $\int$  указывают на совокупность пар  $\mu_A(x)$  и  $x$ .

В *вычислении* степени принадлежности признака (значения контролируемого параметра) технического состояния применены *функции принадлежности* ( $\mu_A(x)$ ), количественно градуирующие принадлежность множества пространства рассуждения  $x \in X$  некоторому нечёткому множеству  $\tilde{A}$  (рисунок 3.2). Значение 0 означает то, что элемент не включен в нечёткое множество, 1 – описывает полностью включенный элемент. Значения между 0 и 1 характеризуют нечётко включенные элементы хронометрированных данных.

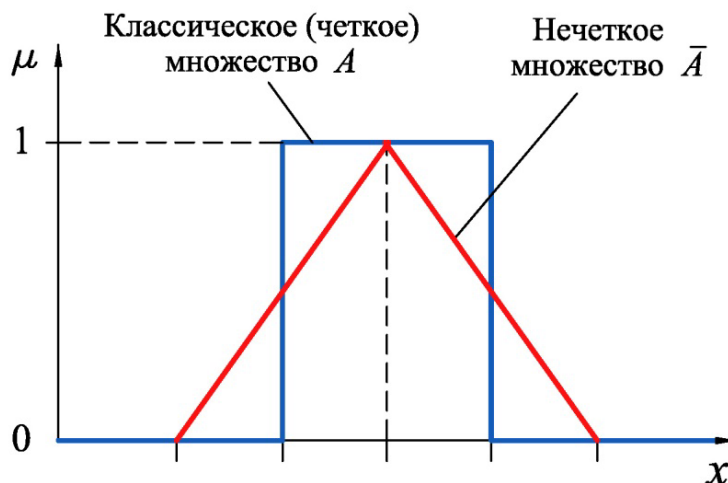


Рисунок 3.2 – Графики функций принадлежности классического (четкого) и нечеткого множества

### 3.1.1 Нечеткая логика в оценке технического состояния строительных конструкций

В основу построения *моделей принятия решений* в нечеткой оценке технического состояния строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений в данной работе положена нечеткая логика, которая предоставляет отличную возможность установления связи между нечеткими законами мышления эксперта (приближенными рассуждениями) с их формальным описанием.

Истинность высказываний в формальной логике основана на правиле *modus ponens*, заключаемая в следующем. Пусть  $A$  – высказывание «несущая способность снижена, но отсутствует опасность внезапного разрушения»,  $B$  – «техническое состояние балки оценивается как ограничено работоспособное». Если же истинны высказывания «несущая способность снижена, но отсутствует опасность внезапного разрушения» (*посылка*) и «если несущая способность снижена, но отсутствует опасность внезапного разрушения ( $A \rightarrow B$ ), то техническое состояние балки оценивается как ограничено работоспособное» (*импликация*), то истинно высказывание «техническое состояние балки оценивается как ограничено работоспособное» (логический вывод).

В реальных рассуждениях правило *modus ponens* используется не в точной, а в приближенной форме. Если  $A$  истинно (**посылка**) и истинно  $A^* \rightarrow B$  (**нечеткая импликация**), где  $A^*$  обладает свойствами, приблизительно сходными со свойствами  $A$ , то  $B$  где-то рядом с истиной (**нечеткий логический вывод**), причем насколько она рядом с истиной – это зависит от других правил. Одним из инструментов описания такого суждения является **композиционное правило вывода**: если известно нечеткое отношение  $\tilde{R}$ , между  $x$  и  $y$ , то при нечетком значении входной переменной  $x = \tilde{A}$  нечеткое значение выходной  $y$  переменной определяется следующим образом:

$$y = \tilde{M} \circ \tilde{R}, \quad (3.3)$$

где знак « $\circ$ » – макси-минная композиция.

Композиционное правило вывода составляет основу *нечеткого логического вывода* – аппроксимация зависимости, в которой каждой выходной лингвистической переменной от входных лингвистических переменных и получение заключения в виде нечеткого множества, соответствующего текущим значениям входов, с использованием нечеткой базы знаний и нечетких операций. Под **нечеткой базой знаний** понимается совокупность правил вида: Если  $\langle$ антецедент (посылка правила) $\rangle$ , то  $\langle$ консеквент (заключение правила) $\rangle$ .

Нечеткий логический вывод в идентификации категории технического состояния включает несколько общепринятых этапов:

- **фаззификация** (введение нечеткости) – определение соответствия между численным значением входной переменной системы нечеткого вывода и значением соответствующего ей терма лингвистической переменной в функции принадлежности.

- **агрегирование** – определение степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода.

- **активизация** – формирование функций принадлежности  $\mu(y)$ , консеквентов каждого из правил;



– **аккумуляция** – определение функции принадлежности выходной лингвистической переменной; результат аккумуляции выходной лингвистической переменной определяется как объединение нечетких множеств всех подзаключений нечеткой базы правил относительно соответствующей лингвистической переменной;

– **дефаззификация** – определение соответствия между нечетким набором значений выводимых лингвистических переменных к точному (четкому) числовому значению.

Последовательность операций нечеткого логического вывода определяет структуру модуля экспертной системы (рисунок 3.3).

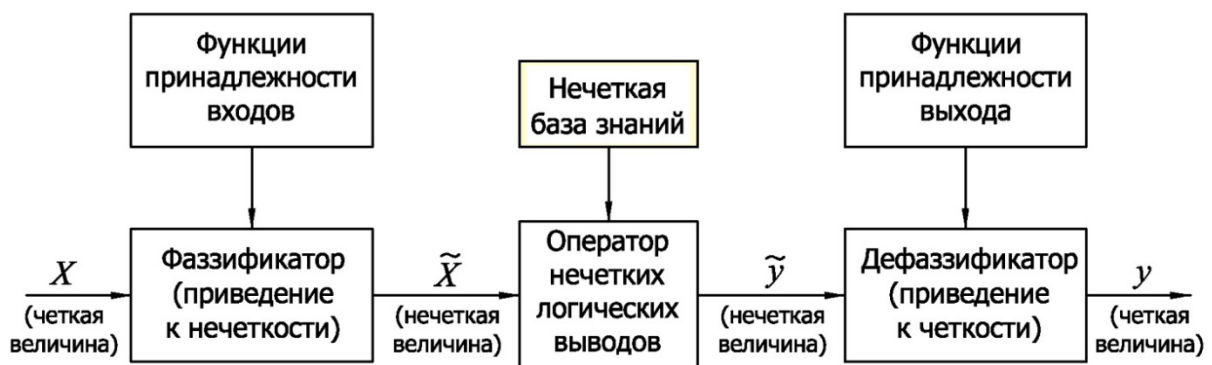


Рисунок 3.3 – Схема нечеткого логического вывода

Правила в нечетких базах знаний технического состояния конструкций связываются между собой логическими операциями «или» ( $\vee$ ), а антецедент состоит из фрагментов, которые связываются операциями «и» ( $\wedge$ ):

$$\mu_{\tilde{A} \wedge \tilde{B}}(x) = \min \{ \mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x) \}; \quad (3.4)$$

$$\mu_{\tilde{A} \vee \tilde{B}}(x) = \max \{ \mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x) \}. \quad (3.5)$$

При формализации нечеткой информации с целью снижения объема вычислений в моделировании рассуждений применены унимодальные нечеткие числа ( $L$ - $R$ ) типа, которые предполагают более простую интерпретацию расширенных бинарных отношений [40]. Их называют – *треугольными*

нечеткими числами или тройкой  $(l, m, u)$ ,  $(l \leq m \leq u)$  действительных чисел, через которые функция принадлежности  $\mu_M$  определяется следующим образом:

$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l}, & \text{если } x \in [l, m], \\ \frac{x-u}{m-u}, & \text{если } x \in [m, u], \\ 0, & \text{в иных случаях.} \end{cases} \quad (3.6)$$

«Переход» строительной конструкции из одного технического состояния в другое, фактически происходит не «скачкообразно», а через несколько промежуточных состояний, границы между которыми размыты. Учитывая это, *состояния конструкций целесообразно описывать нечеткими треугольными числами*. Число  $m$  в тройке  $(l, m, u)$ , называемое **модой**, соответствует *четкому (истинному) значению* оценки. Числа  $l$  и  $u$  устанавливают степень размытости оценки.

На рисунке 3.4 представлено треугольное нечеткое число  $M = (1, 2, 3)$ . Оно адекватно характеризует лингвистическую информацию вида: *«вблизи работоспособного технического состояния», «около работоспособного технического состояния»* или *«приблизительно работоспособное техническое состояние»*.

Соответствующее «пространство» технического состояния конструкции на период ее существования как материального объекта может быть разделено на 4 подобласти (аналогично количеству категорий ГОСТ 31937-2011 [5]) с размытыми границами (рисунок 3.5):  $C_p = C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$ , где  $c_1, c_2, c_3, c_4$  – нечеткие числа, или, фактически, те же термы, описанные треугольными [38] функциями принадлежности, и соответствующие категориям технических состояний: *нормативное* –  $c_1$ , *работоспособное* –  $c_2$ , *ограниченно работоспособное* –  $c_3$ , *аварийное* –  $c_4$ . Согласно шкале категорий технического состояния ГОСТ [5], *нормативное* техническое состояние можно формализовать

нечетким числом с модой равной 1, *работоспособное* – нечетким числом с модой равной 2, *ограниченно-работоспособное* – с модой равной 3, а *аварийное* – 4.

**Предлагается** набор всех нечетких чисел определять в интервале  $[0; 5]$  – период существования конструкции как материального объекта. *Степень эксплуатационной пригодности* конструкции, интересующая специалиста по обследованию, изменяется на интервале  $[1; 4]$  – период эксплуатации (от ввода конструкции в эксплуатацию до выхода из строя). Интервалы  $[0; 1]$  и  $[4; 5]$  – характеризуют изготовление и утилизацию конструкции, соответственно. Графическое отображение указанных нечетких чисел представлено на рисунке 3.5.

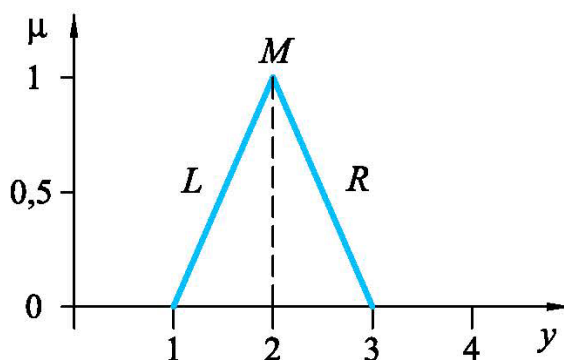


Рисунок 3.4 – Нечеткое треугольное число  $M = (1, 2, 3)$

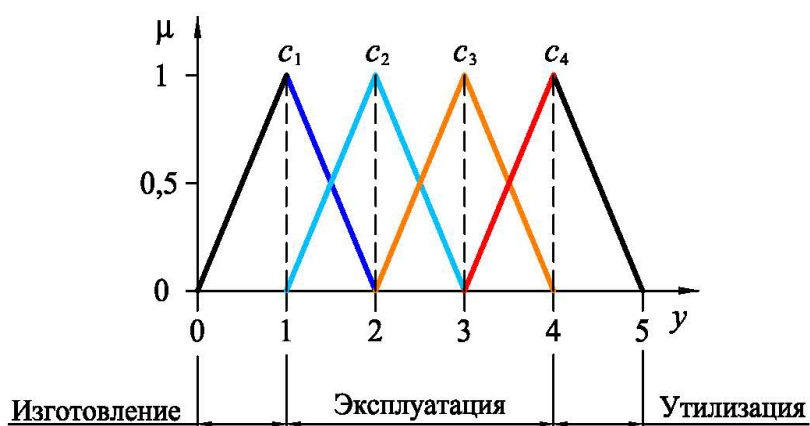


Рисунок 3.5 – Нечеткие треугольные числа в описании результата оценки технического состояния строительных конструкций

### 3.1.2 Математические модели формализации знаний экспертной информации в функциях принадлежности

При описании признаков технического состояния строительных конструкций используют разнородную информацию, которую необходимо формализовать, т.е. получить так называемые *лингвистические оценки* – слова или словосочетания естественного или искусственного языка [34]. *Переменные*, значениями которых могут быть слова или словосочетания, называемые *лингвистическими* [34], описываются пятью типами данных:

$$\langle x, T, X, G, M \rangle, \quad (3.7)$$

где  $x$  – имя переменной;  $T$  – терм множество, каждый элемент которого задается нечетким множеством на универсальном множестве  $X$ ;  $G$  – синтаксические правила, порождающие названия термов;  $M$  – семантические правила, задающие функции принадлежности нечетких термов, порожденных семантическими правилами из  $G$ .

Переменная назначается путем заимствования названия понятия (концепта) из предварительно спроектированной онтологии.

Успех формализации информации в функциях принадлежности тесно связан с выбором шкалы измерений контролируемых параметров каждой конкретной задачи. Для описания *входных переменных*, принимающих значения контролируемых параметров технического состояния конструкций целесообразно использовать три вида шкал – номинальную, интервальную и шкалу отношений [140].

В целях типизации лингвистических высказываний, в данной работе название каждого терма принято в соответствии со следующими специально разработанными положениями. Названием является *имя прилагательное мужского рода* (самостоятельная часть речи, обозначающая непроцессуальный признак предмета), *в единственном числе и именительном падеже*, т.е. отвечает на вопрос «какой?».

Базовыми названиями максимально противоположных по смыслу лингвистических оценок назначены понятия «*высокий*» и «*низкий*». Название «*высокий*» – оценка показателя, характеризующего его как благоприятный фактор, «*низкий*» – неблагоприятная лингвистическая характеристика контролируемого параметра. Учитывая способность человека к дихотомии (разбиению линейного размера пополам), точка середины интервала значений контролируемых параметров соответствует значению «*средний*» (при необходимости). В качестве модификаторов названий термов назначены слова-приставки «*ниже*», «*выше*». Область разбиения шкал контролируемых параметров технического состояния может быть поделена на любое число частей. Таким образом, разбивка на 3 части подразумевает использование трех термов, например, с названиями «*высокий*», «*средний*», «*низкий*». Разбивка на 4 части – «*высокий*», «*выше среднего*», «*ниже среднего*», «*низкий*». Некоторые контролируемые параметры технического состояния конструкций вообще могут отражать лишь характер присутствия или отсутствия признака. В таких случаях их следует интерпретировать при помощи лингвистических переменных с двумя оценочными термами, например, «*высокий*» и «*низкий*». Примеры описания лингвистических переменных для идентификации технического состояния представлены в приложении Б.

**Пример 1.** Искерпыывающй контроль коррозии арматуры железобетонной конструкции, может быть сделан по результатам осмотра поверхности арматуры и измерения остаточной площади ее сечения. Рассмотрим понятия «*Результат освидетельствования коррозии арматуры*» и «*Результат измерения остаточной площади сечения арматуры*», онтологий «*Состояние нормальных сечений*». Представим их лингвистическими переменными с именами и индексами.

Универсальным множеством значений переменной  $x_{1211ns}$  «*Результат освидетельствования коррозии арматуры*» являются возможные состояния арматуры по результатам осмотра. С учетом наколенного опыта визуального обследования арматуры железобетонных конструкций, универсальное множество

рассматриваемой лингвистической переменной задаем из конечного числа следующих классов качественных признаков [117, 129, 131]:

«1» – *поверхность арматуры чистая (при вскрытии);*

«2» – *локальные участки повреждения арматуры поверхностной коррозией (точки и пятна коррозии);*

«3» – *сплошная поверхностная коррозия арматуры;*

«4» – *локальные участки язвенной, пластинчатой коррозии арматуры, растрескивания защитного слоя бетона;*

«5» – *пластинчатая коррозия арматуры, растрескивание и выдавливание защитного слоя бетона продуктами коррозии.*

Описанное множество  $X_{1211ns} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  является дискретным и точным. Разбивая область измерения параметров на 4 части (аналогично, разбиению области измерения технического состояния строительных конструкций, регламентированных ГОСТ), в лингвистическом описании параметра «Результат освидетельствования коррозии арматуры» удобно задействовать 4 лингвистические оценки: «высокий», «выше среднего», «ниже среднего», «низкий». Указанные лингвистические оценки являются термами  $t_{1211ns}^f$ ,  $f = \text{в, вс, нс, н}$ , которые составляют терм-множество  $T_{1211ns}$  для переменной  $x_{1211ns}$ . Т. е. каждый из термов, в рассмотренном случае, характеризует некое условное состояние арматуры, с учетом повреждений коррозией, обнаруженных при ее осмотре. Следует заметить, что лингвистическое описание контролируемых параметров не обязательно должно состоять из 4-х термов.

Нечеткое множество для терма «низкий» качественного контролируемого параметра  $x_{1211ns}$  может быть представлено в виде:

$$\tilde{t}_{1211ns}^H = \left( \frac{0}{1}, \frac{0}{2}, \frac{0,413}{3}, \frac{0,781}{4}, \frac{1}{5} \right).$$

Запись означает, что классы «1» и «2» не принадлежат лингвистической оценке «низкий», т.е. функция принадлежности  $\mu(x_{1211ns})$  при этих значениях равна 0. Класс «3» (сплошная поверхностная коррозия арматуры) может быть отнесен к оценке «низкий» с уверенностью 0,413, класс «4» – с уверенностью 0,781, а при

«5»-м классе признаков функция принадлежности  $\mu(x_{1211ns})$  принимает максимальное значение равное 1, рисунок 3.6. Значения уверенностей (0; 0; 0,413; 0,781; 1) вычисляются по результатам опроса эксперта или группы экспертов, обработанных методами, рассмотренными в п. 3.8. Носителем термина «низкий» являются классы признаков «3», «4» и «5». Ядро термина «низкий» – соответствует классу «5». Точка перехода находится между классами признаков «3» и «4». Функция принадлежности нечеткого термина «низкий» унимодальная. Высота нечеткого множества термина «низкий» равна 1, т.е. множество является нормальным.

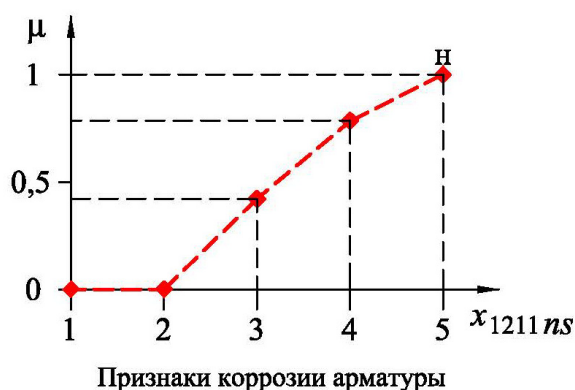


Рисунок 3.6 – График функции принадлежности термина «низкий» переменной «Результат освидетельствования коррозии арматуры»

Переменная  $x_{1212ns}$  «Результат измерения остаточной площади сечения арматуры», очевидно, должна принимать количественные значения из универсального непрерывного множества  $X_{1212ns}$  значений уменьшения площади сечения арматуры в %. Минимальное значение в этом множестве равно 0 (отсутствие уменьшения площади сечения арматуры), максимальное – 100 (сечение арматуры полностью разрушено коррозией).

Как и для подавляющего большинства количественных контролируемых показателей технического состояния строительных конструкций принадлежность конкретного значения уменьшения площади сечения арматуры к состояниям конструкций не может быть четко оговорена. В реальности контроль значения количественного показателя осуществляется при помощи оценки его

принадлежности к определенным интервалам значений. Данный факт, указывает на необходимость описания терм-множеств не только качественных, но и количественных контролируемых параметров. Таким образом, терм-множество  $T_{1212ns}$  переменной  $x_{1212ns}$  составлено из оценок, принимаемых, аналогично, переменной  $x_{1211ns}$ . Т.е., лингвистическая переменная «*Результат освидетельствования коррозии арматуры*» также будет принимать лингвистические оценки «высокий», «выше среднего», «ниже среднего», «низкий» – термы  $t_{1212ns}^f$ ,  $f = в, вс, нс, н$ .

Процесс построения функций принадлежности нечетких термов количественного контролируемого параметра, каким является переменная «*Результат измерения остаточной площади сечения арматуры*», подробно описан в п. 3.2. Запись таких нечетких множеств, например, для терма «низкий» будет иметь вид:

$$\tilde{t}_{1212ns}^н = \int_{[0,100]} \frac{\mu(x_{1212ns})}{x_{1212ns}}. \quad (3.8)$$

где  $\mu(x_{1212ns})$  – непрерывная функция, рисунок 3.7.

$$\mu(x_{1212ns}) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x_{1212ns} < 10 \\ \frac{x-10}{20-10}, & 10 \leq x_{1212ns} < 20 \\ 1, & 20 \leq x_{1212ns} \leq 100 \end{cases}. \quad (3.9)$$

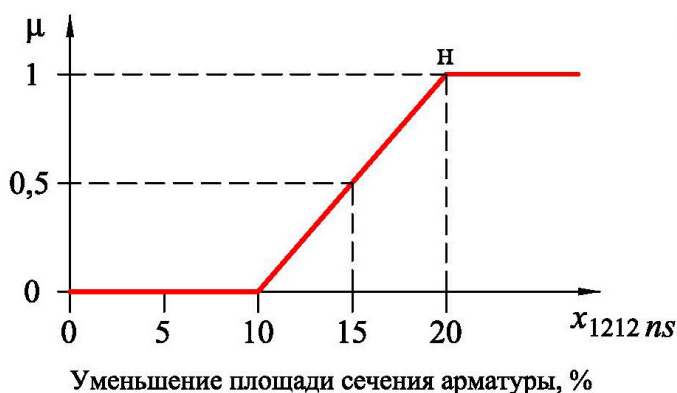


Рисунок 3.7 – График функции принадлежности терма «низкий» переменной «*Результат измерения остаточной площади сечения арматуры*»



Носителем терма «низкий» переменной «*Результат измерения остаточной площади сечения арматуры*», график функции принадлежности которого представлен на рисунке 3.7, являются значения из интервала  $[10; 100]$ . Точка перехода соответствует значению уменьшения площади сечения арматуры на 15 %. Ядром терма «низкий» являются значения из интервала  $[20; 100]$ .

Существует достаточно много методов построения функций принадлежности нечеткого множества, в каждом из которых формулируются свои требования и обоснования именно такого построения [37, 141, 142].

### **3.2 Разработка методики формализации входных количественных и качественных контролируемых параметров технического состояния строительных конструкций**

В некотором смысле функции принадлежности – это база данных, используемая для преобразования входной разнородной информации в формат последующего диалога с базой знаний. Методы построения функций принадлежности условно поделены на две группы – *прямые* и *косвенные* [36]. Выбор метода определяется реальной задачей, характером неопределенности конкретной области модели. На выбор метода построения функций принадлежности влияет также число участников, задействованных в этом процессе – один *эксперт* или *группа экспертов*.

#### **3.2.1 Построение функций принадлежности термов количественных контролируемых параметров технического состояния конструкций**

Для описания контролируемых параметров технического состояния, характеризующихся измеримыми свойствами, когда эксперты далеки от случайных ошибок (ошибки незначительны или маловероятны) применены прямые методы. Прямые методы основаны на непосредственном определении функции принадлежности, их применение обосновано в работе [36]. Значения функции принадлежности  $\mu_A(x)$ , характеризующей контролируемый параметр  $x$ , задаются

экспертом непосредственно и отражают предпочтения эксперта на множестве элементов  $X$  следующим образом [32, 36]:

- для любых  $x_1, x_2 \in X$ ,  $\mu_A(x_1) < \mu_A(x_2)$  тогда и только тогда, когда  $x_2$  предпочтительнее  $x_1$ , т.е. в большей степени характеризуется свойством  $A$ ;
- для любых  $x_1, x_2 \in X$ ,  $\mu_A(x_1) = \mu_A(x_2)$  тогда и только тогда, когда  $x_1$  и  $x_2$  безразличны относительно свойства  $A$ .

Для большинства описанных в специальной литературе измеримых признаков технического состояния, данные о границах интервалов значений контролируемых параметров оговорены достаточно четко. Это, легко позволяет назначить точки перехода для функций принадлежности термов. Для определения ядер и носителей термов недостаточно информации в существующих литературных источниках. Но с приемлемой точностью они могут быть назначены на основании опыта (эвристических знаний) задействованного в разработке эксперта. Сделаны попытки описания участка между оговоренными точками «гладкими» (сигмоидной, гауссовой, колоколообразной) функциями принадлежности [143, 144]. Однако позже было установлено, что мера этого «сглаживания» экспертами может быть представлена по-разному. Для устранения излишней субъективности участки функций принадлежности термов, располагаемые между характерными точками (ядром, точками перехода, носителя) следует описывать прямыми – с помощью «классической» треугольной функции принадлежности с параметрическим описанием вида:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ или } x \geq c, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c. \end{cases} \quad (3.10)$$

Оценочные термы, характеризующие лишь присутствие или отсутствие признака технического состояния конструкции, описываются синглтонной функцией принадлежности:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x = a, \\ 0, & x \neq a. \end{cases} \quad (3.11)$$

Графики треугольной и синглтонной функций принадлежности представлены на рисунке 3.8.

В некоторых случаях, для измеримых признаков технического состояния удобнее применять не треугольную, а ее модифицированный вариант, предлагаемый в данном исследовании, – треугольная «ломаная» функция принадлежности (рисунок 3.9) с параметрическим описанием вида:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1 \text{ или } x \geq c_2, \\ \frac{a_1 - x}{2(a_1 - a_2)}, & a_1 < x \leq a_2, \\ \frac{a_2 - x}{2(a_2 - b)} + 0,5, & a_2 < x \leq b, \\ \frac{x - b}{2(b - c_1)} + 1, & b < x \leq c_1, \\ \frac{x - c_1}{2(c_1 - c_2)} + 0,5 & c_1 < x < c_2. \end{cases} \quad (3.12)$$

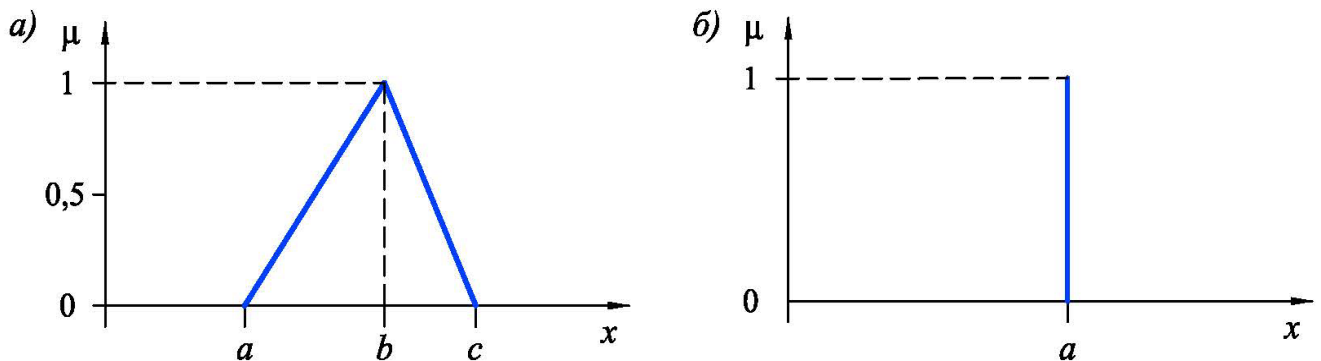


Рисунок 3.8 – Пример графиков востребованных функций принадлежности:

*a* – треугольная; *б* – синглтонная

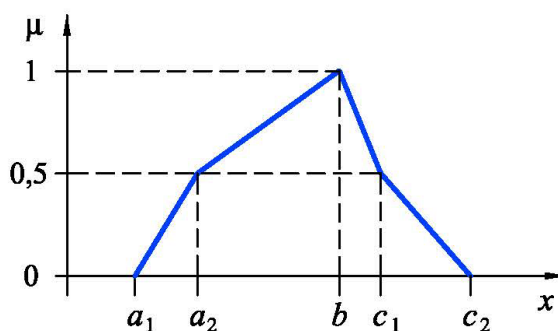


Рисунок 3.9 – График «ломаной» треугольной функции принадлежности, в описании лингвистических оценок (термов) контролируемых параметров технического состояния конструкций

**Пример 2.** Рассмотрим процесс построения функций принадлежности термов переменной *«Результат измерения прочности бетона»*. Значения, принимаемые переменной – это уменьшение прочности бетона в сравнении с ее проектным значением, выраженное в %. Показатель измерим, множество возможных значений известно – отрезок  $[0; 100]$ . Множество термов рассматриваемой лингвистической переменной, как и в рассмотренном ранее примере 1 – {«высокий», «выше среднего», «ниже среднего», «низкий»}.

По результатам анализа и обобщения информации, имеющейся в различных литературных источниках, характеризующей связь между признаками снижения прочности бетона и техническим состоянием железобетонной изгибаемой конструкции, сформированы следующие утверждения:

– к признакам нормативного технического состояния конструкции, характеризующим термом «высокий», может быть отнесено отсутствие снижения прочности бетона;

– к признакам работоспособного технического состояния, характеризующим термом «выше среднего», следует отнести снижение прочности бетона от проектного значения не более 10 %;

– к признакам ограниченно-работоспособного технического состояния, характеризующим лингвистической оценкой «ниже среднего», следует отнести снижение прочности бетона на 10...30 %;

– к признакам аварийного технического состояния, характеризующих лингвистической оценкой «низкий» следует отнести снижение прочности бетона на 30 % и более.

Как и для многих описанных в специальной литературе измеримых признаках технического состояния, данные о границах интервалов значений контролируемых параметров конкретно оговорены. Это, легко позволяет назначать точки перехода для функций принадлежности термов. Так, в рассмотренном примере точки перехода функции принадлежности терма «ниже среднего» будут соответствовать снижению прочности бетона на 10 % и 30 %. Для определения ядер и носителей термов, как видно в рассматриваемом примере, информации недостаточно. Однако, с приемлемой точностью они назначены на основании опыта задеиствованного в разработке эксперта. Нет противоречий в выборе значения ядра функции принадлежности для терма «ниже среднего», среднему значению точек перехода – 20 %. Отрезок носителя этого терма может назначен после уточнения значений ядер функций принадлежности соседних термов –  $[0; 40]$ , а его график – классическая треугольная функция принадлежности. Функция принадлежности терма «высокий» задана синглтонной функцией и принимает максимальное и единственное значение, отличное от нуля, только при отсутствии признаков снижения прочности бетона (0 %). Графики функций принадлежности оговоренных и других термов переменной «Результат измерения прочности бетона» представлен на рисунке 3.10.

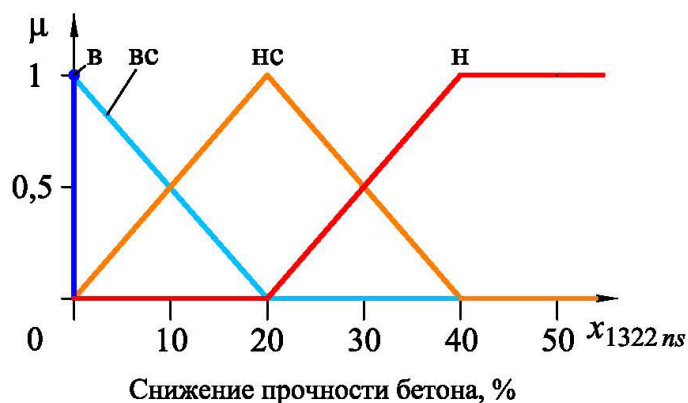


Рисунок 3.10 – Графики функций принадлежности термов переменной «Результат измерения прочности бетона»

### 3.2.2 Построение функций принадлежности термов качественных контролируемых параметров технического состояния конструкций

Для описания понятий и признаков, при отсутствии измеримых свойств, таких как *цвет бетона, внешний вид повреждений арматуры коррозией* и др., рассмотрена применимость некоторых косвенных методов [145]. Косвенные методы более трудоемки в сравнении с прямыми методами, но имеют высокую стойкость к непреднамеренным искажениям в информации, поступающей от экспертов [36].

**Метод Т. Саати** [146] позволяет взаимодействовать экспертам в обсуждении принадлежности признаков техническим состояниям, видоизменять мнения и соединять их в соответствии с выбранным критерием оценки. Суть метода проста и заключается в декомпозиции изучаемой проблемы – на более простые составляющие классы (элементы, альтернативы, признаки, аномалии), и попарном сравнении по их воздействию на общую характеристику, используя ранговые измерения. Выполненные парные сравнения элементов представляются в виде матрицы:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (3.13)$$

где  $a_{ij}$  – уровень значимости элемента  $u_i$  в сравнении с  $u_j$ , определяемый по шкале Саати,  $i, j = \overline{1, n}$ :

- 1 – если одинаковая значимость элементов  $u_i$  и  $u_j$ ;
- 3 – если значимость  $u_i$  в сравнении с  $u_j$  слабая;
- 5 – если значимость  $u_i$  в сравнении с  $u_j$  существенная;
- 7 – если значимость  $u_i$  в сравнении с  $u_j$  сильная;
- 9 – если значимость  $u_i$  в сравнении с  $u_j$  абсолютная;

2, 4, 6, 8 – промежуточные сравнительные оценки: 2 – почти слабая значимость; 4 – почти существенная значимость; 6 – почти сильная значимость; 8 – почти абсолютная значимость.

Матрица парных сравнений является диагональной ( $a_{ii} = 1, i = \overline{1, n}$ ) и обратно симметричной ( $a_{ij} = 1/a_{ji}, i, j = \overline{1, n}$ ) со значением собственного вектора  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  матрицы парных сравнений и максимальным собственным значением матрицы  $\lambda_{\max}$ , определяемых из системы уравнений:

$$\begin{cases} A \cdot W = \lambda_{\max} \cdot W \\ w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1 \end{cases} \quad (3.14)$$

Отклонение максимального значения собственного вектора матрицы служит мерой несогласованности парных сравнений эксперта, определяемое через индекс согласованности предложенный *Saaty*:

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (3.15)$$

где ИС – индекс несогласованности парных сравнений;  $n$  – размерность матрицы  $A$ .

Отношение индекса согласованности к среднему случайному индексу для матрицы того же порядка, называется отношением согласованности (ОС):

$$ОС = \frac{ИС}{СИ}; \quad (3.16)$$

где ИС – индекс согласованности; СИ – случайный индекс.

Для матрицы парных сравнений, полученной в результате опроса эксперта, значение  $ОС \leq 0,15$  является приемлемым [146].

Из-за необходимости вычисления собственного вектора матрицы парных сравнений, а именно решения характеристических уравнений, отмечают высокую сложность использования этого метода. Поэтому, разработчики экспертных систем чаще применяют приближенные методы расчета собственного вектора матрицы или модифицированный метод Т. Саати.

**Модифицированный метод Т. Саати** основан на идее распределения степеней принадлежности элементов универсального множества, согласно их рангам [28, 37, 140, 147]. Рассматривается лингвистический терм  $A$ , формализуемый нечетким множеством в виде совокупности пар:

$$A = \{[u_1, \mu_A(z_1)], [u_2, \mu_A(u_2)], \dots, [u_n, \mu_A(u_n)]\}, \quad (3.17)$$

где  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  – универсальное множество, на котором задается нечеткое множество  $A$ . Ранг элемента  $u_i \in U$  – это число  $r_A(u_i)$ . Для последующих построений вводятся обозначения:  $r_A(u_i) = r_i$  и  $\mu_A(u_i) = \mu_i$ . При этом, правило распределения степеней принадлежности задается в виде системы отношений:

$$\begin{cases} \frac{\mu_1}{r_1} = \frac{\mu_2}{r_2} = \dots = \frac{\mu_n}{r_n}, \\ \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n = 1. \end{cases} \quad (3.18)$$

Задав опорным элементом  $u_i \in U$  с принадлежностью  $\mu_i$ ,  $\mu_j = \frac{r_j}{r_i} \mu_i$  для всех  $j \neq i$ . Степени принадлежности элементов к нечеткому терму  $A$ , учитывая условие нормирования, находят по формулам:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \left(1 + \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_3}{r_1} + \dots + \frac{r_n}{r_1}\right)^{-1} \\ \mu_2 &= \left(\frac{r_1}{r_2} + 1 + \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{r_n}{r_2}\right)^{-1} \\ &\dots \\ \mu_n &= \left(\frac{r_1}{r_n} + \frac{r_2}{r_n} + \frac{r_3}{r_n} + \dots + 1\right)^{-1}. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Построение функции принадлежности модифицированным методом Т. Саати проходит без контроля согласованности матрицы парных сравнений, *в чем его существенный недостаток*.

Несмотря на достаточно длинную шкалу измерений, состоящую из девяти качественных оценок (от 1 до 9), метод Т. Саати *не способен отразить должный*



уровень суждений, учесть нечеткость в высказываниях эксперта. Существуют неучтенные промежуточные интервалы суждений, которые вносят неопределенность в анализ степени превосходства одного значения контролируемого параметра над другим.

Для учета нечеткости между качественными оценками суждений эксперта, возможности метода Т. Саати «усиливают» теорией нечетких множеств. Нечеткость в моделях парных сравнений существенно снижается применением подхода, впервые предложенного *Laarhoven P.J.M* и *Pedrycz W.A* при анализе иерархий, основанного на использовании в сравнительных операциях треугольных нечетких чисел [148]. Математическая обработка получаемых матриц сравнения альтернатив, состоящих из нечетких чисел, выполняется методом *Chang* [149, 150].

Как показал ряд вычислительных экспериментов, проведенных в рамках данного диссертационного исследования (пример 3), *совместное использование методов Т. Саати в сочетании с методом Laarhoven P.J.M и Pedrycz W.A. дает более адекватные результаты в построении функций принадлежности термов переменных в сравнении с известными способами построения функций принадлежности качественных признаков* [145]. Этапы построения функций принадлежности данным методом представлены ниже.

Используя матрицы, сформированные классическим методом, экспертные оценки заменяются нечеткими числами с помощью специальной шкалы (таблица 3.1, рисунок 3.11), сформировав нечеткие матрицы вида [149, 150]:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & (1,1,1) & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & (1,1,1) \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

где  $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) = \tilde{a}_{ji}^{-1} = (1/u_{ji}, 1/m_{ji}, 1/l_{ji})$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ,  $i \neq j$  или  $\tilde{a}_{jp} = (1,1,1)$ ,  $i = j$  – треугольные нечеткие числа, характеризующие значимость альтернативы (элемента множества) в соответствии с принятой для опроса шкалой.

Таблица 3.1 – Шкала преобразований лингвистических оценок экспертов для построения функции принадлежности

| Интенсивность<br>важности | Качественная оценка        | Нечеткое<br>число | Обратное<br>нечеткое число |
|---------------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| Основные оценки           |                            |                   |                            |
| 1 ( <i>E</i> )            | Одинаковая значимость      | (1, 1, 1)         | (1, 1, 1)                  |
| 3 ( <i>L</i> )            | Слабо значимее             | (1/2, 1, 3/2)     | (2/3, 1, 2)                |
| 5 ( <i>S</i> )            | Существенно значимее       | (1, 3/2, 2)       | (1/2, 2/3, 1)              |
| 7 ( <i>H</i> )            | Сильно значимее            | (3/2, 2, 5/2)     | (2/5, 1/2, 2/3)            |
| 9 ( <i>A</i> )            | Абсолютно значимее         | (2, 5/2, 3)       | (1/3, 2/5, 1/2)            |
| Промежуточные оценки      |                            |                   |                            |
| 2 ( <i>nL</i> )           | Почти слабо значимее       | (1/4, 3/4, 5/4)   | (4/5, 4/3, 4)              |
| 4 ( <i>nS</i> )           | Почти существенно значимее | (3/2, 5/4, 7/4)   | (4/7, 4/5, 2/3)            |
| 6 ( <i>nH</i> )           | Почти сильно значимее      | (5/4, 11/4, 9/4)  | (4/9, 4/11, 4/5)           |
| 8 ( <i>nA</i> )           | Почти абсолютно значимее   | (7/4, 9/4, 11/4)  | (4/11, 4/9, 4/7)           |

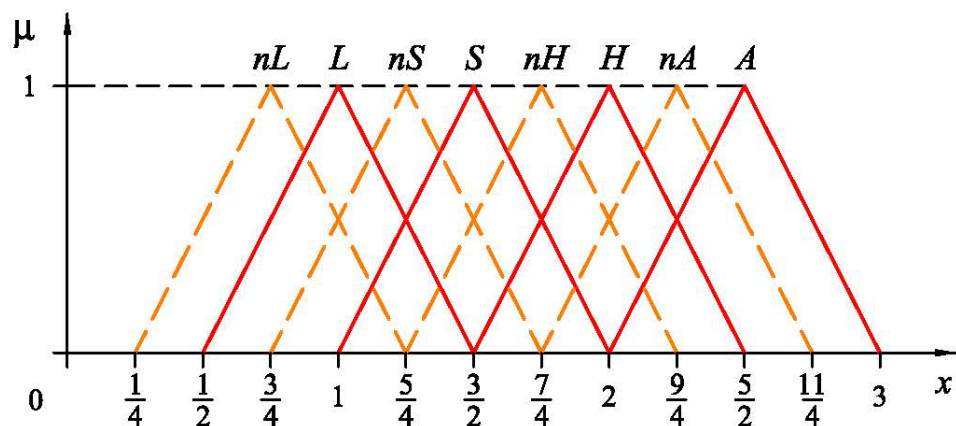


Рисунок 3.11 – Графическое отображение треугольных нечетких чисел шкалы качественных оценок

Методом, предложенным *Chang*, вычисляются приведенные нечеткие значения сравниваемых элементов:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (3.21)$$

При помощи операции нечеткого сложения определяется величина  $\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ :

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j) \quad (3.22)$$

затем, для вычисления значения  $\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}$ , определяют нечеткий вектор  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (\sum_{j=1}^n l_i, \sum_{j=1}^n m_i, \sum_{j=1}^n u_i) \quad (3.23)$$

и обратное вышеприведенному вектору нечеткое число:

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{j=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{j=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{j=1}^n l_i} \right). \quad (3.24)$$

Выполняя сравнение альтернатив, например,  $M_2$  и  $M_1$ , как треугольных нечетких чисел, производится оценка возможности выполнения неравенства:

$$M_2 = (l_2, m_2, u_2) \geq M_1 = (l_1, m_1, u_1) \quad (3.25)$$

Выполнение неравенства  $V(M_2 \geq M_1)$  оценивается по формуле:

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{a \geq b} [\min(\mu_{M_1}(a), \mu_{M_2}(b))] \quad (3.26)$$

Неравенство  $V(M_2 \geq M_1)$  может быть представлено в виде:

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1, & \text{если } m_2 \geq m_1, \\ 0, & \text{если } l_1 \geq u_2, \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{в иных случаях.} \end{cases} \quad (3.27)$$

Графическое представление приведено на рисунке 3.12, где  $d$  – наибольшее значение ординаты пересечения нечетких чисел, т. е. точек пересечения  $\mu(x_i)$ .

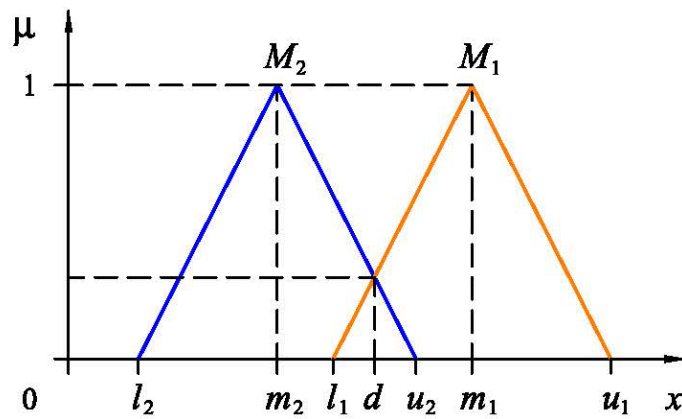


Рисунок 3.12 – Графическое представление оценки сравнений треугольных нечетких чисел

Для сравнения  $M_2$  и  $M_1$ , вычисляются оценки выполнения неравенств в каждом из двух возможных случаев:  $V(M_2 \geq M_1)$ .

Наибольшее значение нечеткого выпуклого числа из  $k$  нечетких чисел  $M_i (i=1,2,\dots,k)$  определяется по формуле:

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \wedge (M \geq M_2), \dots, (M \geq M_k)] = \min V(M \geq M_i). \quad (3.28)$$

Обозначив результаты сравнения  $d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)$  для  $k=1,2,\dots,n$ , определяется вектор:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n)), \quad (3.29)$$

где  $A_i (i=\overline{1,n})$  – классы признаков технического состояния. Координаты найденных векторов и являются степенями принадлежности классов признаков технического к нечетким термам.

**Пример 3.** Рассмотрим построение функций принадлежности переменной «Результат освидетельствования прочности бетона» методами Т. Саати  $(\widetilde{T}_1 = \tilde{t}_1^{f_1} \dots \tilde{t}_1^{f_i})$ , модифицированным методом Т. Саати  $(\widetilde{T}_2 = \tilde{t}_2^{f_1} \dots \tilde{t}_2^{f_i})$  и методом Т. Саати в комплексе с методом *Laarhoven P.J.M* и *Pedrycz W.A.*  $(\widetilde{T}_3 = \tilde{t}_3^{f_1} \dots \tilde{t}_3^{f_i})$ .

Учитывая наколенный опыт, традиционно используется упрощенный метод исследования бетона (простукивание с помощью молотка и зубила)

железобетонных конструкций, универсальное множество рассматриваемой лингвистической переменной задаем из конечного числа следующих четырех классов качественных признаков ( $x=1, 2, 3, 4$ ) [117, 129, 145]:

«1» – *при простукивании бетона издается звонкий звук, следов и сколов при ударах и царапании не остается;*

«2» – *при простукивании бетона издается довольно звонкий звук. Остаются малозаметные (в мм) сколы, при царапании остаются малозаметные штрихи;*

«3» – *при простукивании бетона присутствует глухой звук в сочетании со звонким, заостренные предметы (зубило) вбиваются в бетон на глубину до 10 мм, остаются заметные сколы;*

«4» – *при простукивании бетона издается только глухой звук, заостренные предметы (зубило) довольно легко вбиваются в бетон на глубину 20 мм и более, остаются глубокие сколы.*

Показатель освидетельствования прочности (качества) бетона будем оценивать при помощи четырех термов  $f = v, вс, нс, н$ : «высокий», «выше среднего», «ниже среднего», «низкий».

Например, для каждой пары классов по отношению к свойству нечеткого множества «высокий» получены следующие ответы эксперта:

- одинаковая значимость класса «1» с «1» (1 бал);
- слабая значимость «1» в сравнении с «2» (3 балла, т.е. высказывание «2» эксперт также посчитал приемлемым для оценки «высокий», при этом оно незначительно уступает высказыванию «1»);
- абсолютная значимость «1» в сравнении с «3» (9 баллов, т.е. лингвистическое значение «3» эксперт посчитал абсолютно не совместимым с оценкой «высокий», четко отделив «1» от «3»);
- абсолютная значимость «1» в сравнении с «4» (9 баллов, т.е. высказывание «4» эксперт посчитал абсолютно несовместимым с оценкой «высокий», при этом четко отделив «1» от «4»);
- одинаковая значимость класса «2» с «2» (1 бал);

– сильная значимость «2» в сравнении с «3» (7 баллов, т.е. высказывание «2» эксперт посчитал при таком сравнении наиболее приемлемым для оценки «высокий»);

– абсолютная значимость «2» в сравнении с «4» (7 баллов, т.е. высказывание «2» эксперт посчитал при таком сравнении наиболее приемлемым для оценки «высокий»);

– одинаковая значимость сравнения «3» с «3» (1 балл);

– слабая значимость «3» в сравнении с «4» (1 балл, т.е. высказывание «3» эксперт посчитал неприемлемым для оценки «высокий», так же как и «4»).

Представленные парные сравнения, а также значения парных сравнений по отношению лингвистическим оценкам «выше среднего», «ниже среднего», «низкий» для построения функций принадлежности термов методом Т. Саати представлены в таблице 3.2. Отношение согласованности в парных сравнениях элементов не превышает 0,06, что значительно ниже граничного значения и говорит о хорошей согласованности ответов эксперта. Собственный вектор матриц парных сравнений определен с помощью степенного метода [151], обеспечивающего приемлемую точность вычислений.

Таблица 3.2 – Матрицы парных сравнений значений лингвистической переменной «Результат освидетельствования прочности бетона» с результатами их обработки по методу Т. Саати

| Парные сравнения        |     |     |     |     | Примечание                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Нечеткий терм «высокий» |     |     |     |     |                                                                                                                                                                                                                         |
| Классы признаков        | «1» | «2» | «3» | «4» | Максимальное собственное число матрицы – 4,09;<br>Индекс согласованности – 0,03;<br>Отношение согласованности – 0,033;<br>$\tilde{t}_1 = \left( \frac{1}{1}, \frac{0,505}{2}, \frac{0,088}{3}, \frac{0,09}{4} \right).$ |
| «1»                     | 1   | 3   | 9   | 9   |                                                                                                                                                                                                                         |
| «2»                     | 1/3 | 1   | 7   | 7   |                                                                                                                                                                                                                         |
| «3»                     | 1/9 | 1/7 | 1   | 1   |                                                                                                                                                                                                                         |
| «4»                     | 1/9 | 1/7 | 1   | 1   |                                                                                                                                                                                                                         |

| Парные сравнения                       |     |     |     |     | Примечание                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Нечеткий терм « <i>выше среднего</i> » |     |     |     |     |                                                                                                                                                                                                                                 |
| Классы признаков                       | «1» | «2» | «3» | «4» | Максимальное собственное число матрицы – 4,18;<br>Индекс согласованности – 0,06;<br>Отношение согласованности – 0,067;<br>$\tilde{t}_1^{bc} = \left( \frac{0,526}{1}, \frac{1}{2}, \frac{0,193}{3}, \frac{0,071}{4} \right)$ .  |
| «1»                                    | 1   | 1/3 | 4   | 8   |                                                                                                                                                                                                                                 |
| «2»                                    | 3   | 1   | 5   | 9   |                                                                                                                                                                                                                                 |
| «3»                                    | 1/4 | 1/5 | 1   | 4   |                                                                                                                                                                                                                                 |
| «4»                                    | 1/8 | 1/9 | 1/4 | 1   |                                                                                                                                                                                                                                 |
| Нечеткий терм « <i>ниже среднего</i> » |     |     |     |     |                                                                                                                                                                                                                                 |
| Классы признаков                       | «1» | «2» | «3» | «4» | Максимальное собственное число матрицы – 4,14;<br>Индекс согласованности – 0,047;<br>Отношение согласованности – 0,052;<br>$\tilde{t}_1^{nc} = \left( \frac{0,069}{1}, \frac{0,252}{2}, \frac{1}{3}, \frac{0,314}{4} \right)$ . |
| «1»                                    | 1   | 1/4 | 1/9 | 1/7 |                                                                                                                                                                                                                                 |
| «2»                                    | 4   | 1   | 1/5 | 1   |                                                                                                                                                                                                                                 |
| «3»                                    | 9   | 5   | 1   | 4   |                                                                                                                                                                                                                                 |
| «4»                                    | 7   | 1   | 1/4 | 1   |                                                                                                                                                                                                                                 |
| Нечеткий терм « <i>низкий</i> »        |     |     |     |     |                                                                                                                                                                                                                                 |
| Классы признаков                       | «1» | «2» | «3» | «4» | Максимальное собственное число матрицы – 4,077;<br>Индекс согласованности – 0,026;<br>Отношение согласованности – 0,029;<br>$\tilde{t}_1^n = \left( \frac{0,088}{1}, \frac{0,091}{2}, \frac{0,487}{3}, \frac{1}{4} \right)$ .   |
| «1»                                    | 1   | 1   | 1/7 | 1/9 |                                                                                                                                                                                                                                 |
| «2»                                    | 1   | 1   | 1/5 | 1/9 |                                                                                                                                                                                                                                 |
| «3»                                    | 7   | 5   | 1   | 1/3 |                                                                                                                                                                                                                                 |
| «4»                                    | 9   | 9   | 3   | 1   |                                                                                                                                                                                                                                 |

Графики функций принадлежности нечетких термов переменной «*Результат освидетельствования прочности бетона*», полученных методом Т. Саати представлены на рисунке 3.13.

Матрицы парных сравнений значений лингвистической переменной, итоговые результаты их обработки с использованием модифицированного метода Т. Саати представлены в таблице 3.3, графики функций принадлежности представлены на рисунке 3.13.

Таблица 3.3 – Матрицы парных сравнений значений лингвистической переменной «Результат освидетельствования прочности бетона» и итоговые результаты их обработки с использованием модифицированного метода Т. Саати

| Парные сравнения              |     |     |     |     | Примечание                                                                                                    |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Нечеткий терм «высокий»       |     |     |     |     |                                                                                                               |
| Классы признаков              | «1» | «2» | «3» | «4» | $\tilde{t}_2^{\text{в}} = \left( \frac{1}{1}, \frac{0,777}{2}, \frac{0,111}{3}, \frac{0,111}{4} \right)$      |
| «1»                           | 1   | 7/9 | 1/9 | 1/9 |                                                                                                               |
| «2»                           | 9/7 | 1   | 1/7 | 1/7 |                                                                                                               |
| «3»                           | 9   | 7   | 1   | 1   |                                                                                                               |
| «4»                           | 9   | 7   | 1   | 1   |                                                                                                               |
| Нечеткий терм «выше среднего» |     |     |     |     |                                                                                                               |
| Классы признаков              | «1» | «2» | «3» | «4» | $\tilde{t}_2^{\text{вс}} = \left( \frac{0,778}{1}, \frac{1}{2}, \frac{0,556}{3}, \frac{0,111}{4} \right)$     |
| «1»                           | 1   | 9/7 | 5/7 | 1/7 |                                                                                                               |
| «2»                           | 7/9 | 1   | 5/9 | 1/9 |                                                                                                               |
| «3»                           | 7/5 | 9/5 | 1   | 1/5 |                                                                                                               |
| «4»                           | 7   | 9   | 5   | 1   |                                                                                                               |
| Нечеткий терм «ниже среднего» |     |     |     |     |                                                                                                               |
| Классы признаков              | «1» | «2» | «3» | «4» | $\tilde{t}_2^{\text{нс}} = \left( \frac{0,111}{1}, \frac{0,444}{2}, \frac{0,999}{3}, \frac{0,777}{4} \right)$ |
| «1»                           | 1   | 4   | 9   | 7   |                                                                                                               |
| «2»                           | 1/4 | 1   | 9/4 | 7/4 |                                                                                                               |
| «3»                           | 1/9 | 4/9 | 1   | 7/9 |                                                                                                               |
| «4»                           | 1/7 | 4/7 | 9/7 | 1   |                                                                                                               |
| Нечеткий терм «низкий»        |     |     |     |     |                                                                                                               |
| Классы признаков              | «1» | «2» | «3» | «4» | $\tilde{t}_2^{\text{н}} = \left( \frac{0,111}{1}, \frac{0,333}{2}, \frac{0,777}{3}, \frac{1}{4} \right)$      |
| «1»                           | 1   | 3   | 7   | 9   |                                                                                                               |
| «2»                           | 1/3 | 1   | 7/3 | 3   |                                                                                                               |
| «3»                           | 1/7 | 3/7 | 1   | 9/7 |                                                                                                               |
| «4»                           | 1/9 | 1/3 | 7/9 | 1   |                                                                                                               |



Для построения функций принадлежности  $\tilde{T}_3 = \tilde{t}_3^{f_1} \dots \tilde{t}_3^{f_i}$ , используя матрицы, сформированные классическим методом Т. Саати, экспертные оценки заменяем нечеткими числами, сформировав нечеткие матрицы (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Нечеткие матрицы парных сравнений значений лингвистической переменной «*Результат освидетельствования прочности бетона*»

| Парные сравнения              |                 |                 |                 |                  |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Нечеткий терм «высокий»       |                 |                 |                 |                  |
| Классы признаков              | «1»             | «2»             | «3»             | «4»              |
| «1»                           | (1, 1, 1)       | (1/2, 1, 3/2)   | (2, 5/2, 3)     | (2, 5/2, 3)      |
| «2»                           | (2/3, 1, 2)     | (1, 1, 1)       | (3/2, 2, 5/2)   | (3/2, 2, 5/2)    |
| «3»                           | (1/3, 2/5, 1/2) | (2/5, 1/2, 2/3) | (1, 1, 1)       | (1, 1, 1)        |
| «4»                           | (1/3, 2/5, 1/2) | (2/5, 1/2, 2/3) | (1, 1, 1)       | (1, 1, 1)        |
| Нечеткий терм «выше среднего» |                 |                 |                 |                  |
| Классы признаков              | «1»             | «2»             | «3»             | «4»              |
| «1»                           | (1, 1, 1)       | (2/3, 1, 2)     | (3/2, 5/4, 7/4) | (7/4, 9/4, 11/4) |
| «2»                           | (1/2, 1, 3/2)   | (1, 1, 1)       | (1, 3/2, 2)     | (2, 5/2, 3)      |
| «3»                           | (4/7, 4/5, 2/3) | (1/2, 2/3, 1)   | (1, 1, 1)       | (3/2, 5/4, 7/4)  |
| «4»                           | (1/3, 4/9, 4/7) | (1/3, 2/5, 1/2) | (4/7, 4/5, 2/3) | (1, 1, 1)        |
| Нечеткий терм «ниже среднего» |                 |                 |                 |                  |
| Классы признаков              | «1»             | «2»             | «3»             | «4»              |
| «1»                           | (1, 1, 1)       | (4/7, 4/5, 2/3) | (1/3, 2/5, 1/2) | (2/5, 1/2, 2/3)  |
| «2»                           | (3/2, 5/4, 7/4) | (1, 1, 1)       | (1/2, 2/3, 1)   | (1, 1, 1)        |
| «3»                           | (2, 5/2, 3)     | (1, 3/2, 2)     | (1, 1, 1)       | (3/2, 5/4, 7/4)  |
| «4»                           | (3/2, 2, 5/2)   | (1, 1, 1)       | (4/7, 4/5, 2/3) | (1, 1, 1)        |
| Нечеткий терм «низкий»        |                 |                 |                 |                  |
| Классы признаков              | «1»             | «2»             | «3»             | «4»              |
| «1»                           | (1, 1, 1)       | (1, 1, 1)       | (2/5, 1/2, 2/3) | (1/3, 2/5, 1/2)  |
| «2»                           | (1, 1, 1)       | (1, 1, 1)       | (1/2, 2/3, 1)   | (1/3, 2/5, 1/2)  |
| «3»                           | (1/2, 2, 5/2)   | (1, 3/2, 2)     | (1, 1, 1)       | (2/3, 1, 2)      |
| «4»                           | (2, 5/2, 3)     | (2, 5/2, 3)     | (1/2, 1, 3/2)   | (1, 1, 1)        |

В таблицах 3.5 и 3.6 представлены промежуточные результаты обработки нечетких матриц «*Результат освидетельствования прочности бетона*» методом *Chang D.Y.* по критерию «*высокий*».

Таблица 3.5 – Промежуточные результаты обработки нечеткой матрицы для построения функции принадлежности терма «*высокий*»

|                                                          | $l$   | $m$   | $u$   |
|----------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| $\sum M_1$                                               | 5,50  | 7,00  | 8,50  |
| $\sum M_2$                                               | 4,67  | 6,00  | 8,00  |
| $\sum M_3$                                               | 2,73  | 2,90  | 3,17  |
| $\sum M_4$                                               | 2,73  | 2,90  | 3,17  |
| $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j$                     | 15,63 | 18,80 | 22,83 |
| $\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}$ | 0,044 | 0,053 | 0,064 |

Таблица 3.6 – Приведенные нечеткие числа, полученные в результате обработки нечеткой матрицы парных сравнений альтернатив по критерию «*высокий*»

|       | $l$   | $m$   | $u$   |
|-------|-------|-------|-------|
| $S_1$ | 0,241 | 0,372 | 0,544 |
| $S_2$ | 0,204 | 0,319 | 0,512 |
| $S_3$ | 0,120 | 0,154 | 0,203 |
| $S_4$ | 0,120 | 0,154 | 0,203 |

Сравнивая нечеткие треугольные числа, представленные в таблице 3.6, получены следующие значения оценок:

$$V(S_1 > S_2) = 1; V(S_1 > S_3) = 1; V(S_1 > S_4) = 1;$$

$$V(S_2 > S_1) = 0,836; V(S_2 > S_3) = 1; V(S_2 > S_4) = 1;$$

$$V(S_3 > S_1) = 0; V(S_3 > S_2) = 0; V(S_3 > S_4) = 1;$$

$$V(S_4 > S_1) = 0; V(S_4 > S_2) = 0; V(S_4 > S_4) = 1.$$

По результатам представленных выше сравнений нечетких чисел, находим значения степеней принадлежности элементов, например к нечеткому терму «высокий»:  $d'(1) = 1$ ;  $d'(2) = 0,836$ ;  $d'(3) = 0$ ;  $d'(4) = 0$ . Результаты вычисления степеней принадлежности элементов универсального множества (классов признаков) ко всем нечетким термам переменной «*Результат освидетельствования прочности бетона*», полученным в результате обработки нечетких матриц методом *Chang* (рисунок 3.13):

$$\tilde{t}_3^{\sim B} = \left( \frac{1}{1}, \frac{0,836}{2}, \frac{0}{3}, \frac{0}{4} \right); \tilde{t}_3^{\sim BC} = \left( \frac{0,912}{1}, \frac{1}{2}, \frac{0,403}{3}, \frac{0}{4} \right);$$

$$\tilde{t}_3^{\sim HC} = \left( \frac{0}{1}, \frac{0,190}{2}, \frac{1}{3}, \frac{0,410}{4} \right); \tilde{t}_3^{\sim H} = \left( \frac{0}{1}, \frac{0}{2}, \frac{0,755}{3}, \frac{1}{4} \right).$$

Совместное использование методов Т. Саати в сочетании с методом *Laarhoven P.J.M* и *Pedrycz W.A* имеет следующие *преимущества* над другими методами [145]:

- возможность контролировать искажения информации, несоответствия в высказываниях и производить корректировку матриц парных сравнений в процессе их формирования;
- возможность учета нечеткости между лингвистическими значениями контролируемого параметра в отличие от модифицированного метода Т. Саати;
- функция принадлежности точнее и адекватнее отражает эвристические знания эксперта в сравнении с обычным и модифицированным методом Т. Саати.

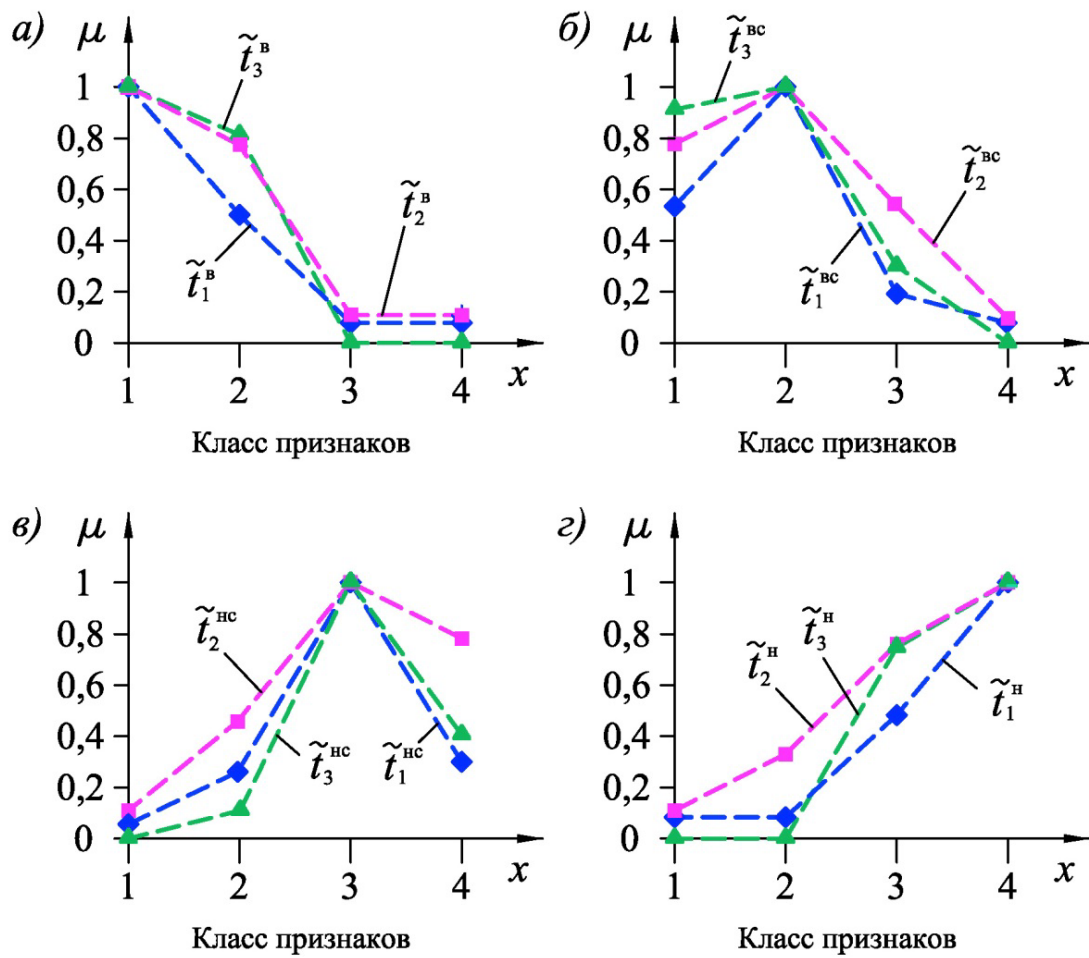


Рисунок 3.13 – Графики функций принадлежности термов:

«высокий» (а), «выше среднего» (б), «ниже среднего» (в), «низкий» (г)

построенных методами Т. Саати ( $\tilde{T}_1$ ), модифицированным методом Т. Саати ( $\tilde{T}_2$ )

и методом Т. Саати в сочетании методом *Laarhoven P.J.M* и *Pedrycz W.A.* ( $\tilde{T}_3$ )

### 3.3 Структура математической модели для идентификации категории технического состояния строительных конструкций с применением теории нечетких множеств и нечеткой логики

Состояние конструкции в целом представляется декартовым произведением пространств входа и выхода [152]:

$$C \subset X^* \times Y^*, \quad (3.30)$$

где  $X^*$  – множество входных значений контролируемых параметров  $\{X_i^*\}$ ,  $Y^*$  – множество выходных значений контроля состояния. Поиск экспертного заключения (категории технического состояния) обозначено выражением:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \rightarrow y, \quad (3.31)$$

где  $X = \{x_i\}$  – множество контролируемых параметров технического состояния обследуемой конструкции, « $\rightarrow$ » – обозначение процедуры логического вывода (импликация, оператор);  $y$  – выходной параметр (класс – категория технического состояния конструкции).

Для принятия решения в назначении категории технического состояния конструкций, как для задачи, где в первую очередь важно объяснение, предложено использовать алгоритм *Мамдани*, предусматривающий базу знаний в виде разбиения пространства влияющих факторов на подобласти с размытыми границами, внутри которых функция отклика принимает нечеткое значение [38].

Формирование базы знаний *Мамдани*, в которой все значения входных и выходной переменных задаются нечеткими множествами в виде [38]:

$$(x_1 = \tilde{t}_{1j} \Theta x_2 = \tilde{t}_{2j} \Theta_j \dots \Theta_j x_n = \tilde{t}_{nj} \text{ с весом } w_j) \rightarrow y = \tilde{d}_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (3.32)$$

где  $\tilde{t}_{ij}$  – нечеткий терм, которым оценивается переменная  $x_i$  в  $j$ -м правиле;  $\tilde{d}_j$  – заключение  $j$ -го правила;  $m$  – количество правил в базе знаний;  $\Theta_j$  – логическая операция, связывающая фрагменты антецедента (посылки)  $j$ -го правила (операция «и» или «или»); « $\rightarrow$ » – нечеткая импликация.

Обозначив  $\mu(x_i)$  функцию принадлежности входа  $x_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i]$  нечеткому терму  $\tilde{t}_{ij}$ , т. е.  $\tilde{t}_{ij} = \int_{x_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i]} \mu_j(x_i) / x_i$ , а  $\mu_{s_j}(y)$  – функцию принадлежности выхода  $y \in [\underline{y}, \overline{y}]$  нечеткому терму  $\tilde{c}_j$ , т. е.  $\tilde{c}_j = \int_{y \in [\underline{y}, \overline{y}]} \mu_{s_j}(y) / y$ , степень выполнения посылки  $j$ -го правила для текущего входного вектора  $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  рассчитывается так:

$$\mu_j(X^*) = w_j(\mu_j(x_1^*)) \chi_j \mu_j(x_2^*) \chi_j \dots \chi_j \mu_j(x_n^*), \quad j = \overline{1, m}, \quad (3.33)$$

где  $\chi_j$  – обозначает  $t$ -норму, если в  $j$ -м правиле базы знаний используется логическая операция «и», т. е. при  $\Theta = \langle \text{и} \rangle$ , или  $s$ -норму при  $\Theta = \langle \text{или} \rangle$ . Треугольные нормы реализуются операциями минимума ( $t$ -норма) и максимума ( $s$ -норма).

Для идентификации категории технического состояния строительных конструкций входные параметры  $(x_i, i=1:n)$ , содержащие неопределенность, и выходной параметр  $y$ , рассмотрены как лингвистические переменные. Эти переменные заданы на соответствующих универсальных множествах  $X_i^* = [\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ ,  $Y^* = [\underline{y}, \overline{y}]$  нечеткими множествами (где  $\underline{x}_i$  и  $\overline{x}_i$  – минимальное и максимальное значения входных переменных, граничные значения универсумов контролируемых параметров;  $\underline{y}$  и  $\overline{y}$  – минимальное и максимальное выходной переменной, граничные значения отрезка «жизненного цикла конструкции»).

*Терм-множества* (совокупности лингвистических значений (оценок) представляются в виде:

– для входной переменной  $x_i$

$$T = \{t_i^1, \dots, t_i^{d_i}\}; \quad (3.34)$$

– для выходной переменной  $y$

$$C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}, \quad (3.35)$$

где  $t_i^{d_i}$  –  $d$ -й лингвистический терм переменной  $x_i$ ;  $c_1, c_2, c_3, c_4$  – термы выходной переменной  $y$ , соответствующие категориям технических состояний:  $c_1$  – *нормативное техническое состояние*,  $c_2$  – *работоспособное техническое состояние*,  $c_3$  – *ограниченно работоспособное техническое состояние*,  $c_4$  – *аварийное техническое состояние*, в соответствии с [5].

Обозначим функции интерпретации отношений между понятиями, входящими в одну из подзадач  $p$  (составляющая задача – некоторая часть задачи идентификации категории технического состояния всей конструкции), следующим выражением (рисунок 3.14) [152]:

$$y_p^l = f(X_p^{l+1}, Y_p^{l+1}), \quad (3.36)$$

где  $y_p^l$  – результат решения подзадачи, характеризующей состояние параметра (в соответствии с декларативными знаниями о понятии), расположенном на  $l$ -м уровне онтографа ( $p$ -я задача оценки состояния составляющей части конструкции на  $l$ -м уровне онтографа);  $X_p^{l+1} = \{x_{p1}^{l+1} \dots x_{pg}^{l+1} \dots x_{pz}^{l+1}\}$ ,  $f = \overline{1, h}$ ,  $h = \text{card } X_p^{l+1}$  – конечное множество входных контролируемых параметров, расположенных на  $(l+1)$ -м уровне онтографа, влияющих на значение  $p$ -го параметра;  $Y_p^{l+1} = \{y_{p1}^{l+1} \dots y_{pg}^{l+1} \dots y_{pz}^{l+1}\}$ ,  $g = \overline{1, z}$ ,  $z = \text{card } Y_p^{l+1}$  – конечное множество показателей состояний, расположенных на  $(l+1)$ -м уровне онтографа, влияющих на значение  $p$ -го показателя (выходные переменные смежных задач).

Состояние части (узла, зоны, детали) конструкции, характеризуемое параметром  $y_p^l$ , определяется декартовым произведением множеств входа и выхода  $PA \times PB$ , где:  $PA$  – множество входных в зависимость значений параметров из множеств  $X_p^{l+1}, Y_p^{l+1}$ ;  $PB$  – множество выходных значений параметра  $y_p^l$ . При нечеткости в значениях параметров  $X_p^{l+1}, Y_p^{l+1}$  параметр  $y_p^l$  может принимать значения в виде нечеткого подмножества  $\tilde{B}$ :

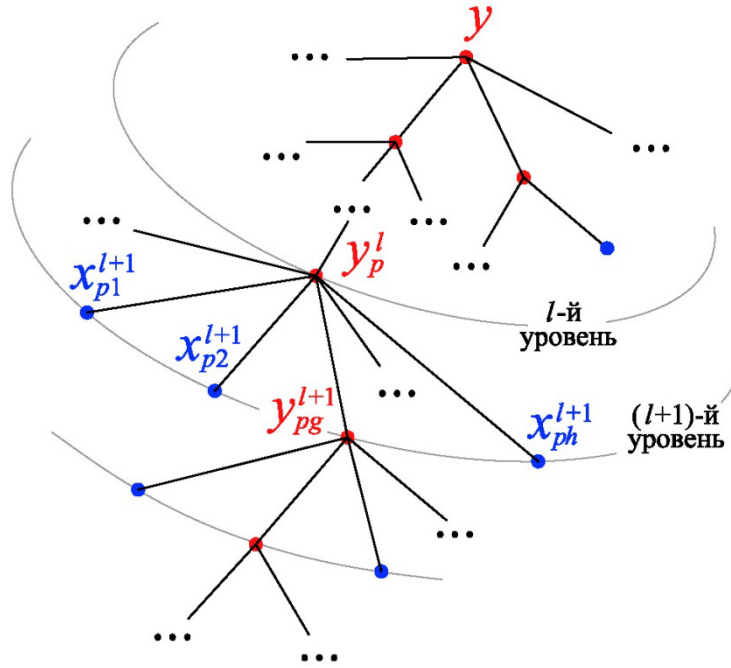


Рисунок 3.14 – Отображение параметров и отношений между ними для идентификации технического состояния конструкции

$$\tilde{B} = \tilde{A} \circ \tilde{R}, \quad (3.37)$$

где  $\tilde{A}$  – нечеткое подмножество множеств  $T_p^{l+1} \subset PA$ ,  $S_p^{l+1} \subset PA$ ,  
 $T_p^{l+1} = \{t_{pf}^{(l+1)1} \dots t_{pf}^{(l+1)d} \dots t_{pf}^{(l+1)n}\}$ ,  $d = \overline{1, n}$ ,  $S_p^{l+1} = \{s_{pg}^{(l+1)1} \dots s_{pg}^{(l+1)k} \dots s_{pg}^{(l+1)m}\}$ ,  $k = \overline{1, m}$ ,  $T_p^{l+1}$  и  $S_p^{l+1}$  –  
 терм-множества переменных, соответственно,  $X_p^{l+1}$  и  $Y_p^{l+1}$ ;  $t_{pf}^{(l+1)d}$  –  $d$ -й  
 лингвистический терм переменной  $x_{pf}^{l+1}$  (лингвистические значения вида:  
 «высокий», «выше среднего», «ниже среднего» и др.);  $s_{pg}^{(l+1)k}$  –  $k$ -й  
 лингвистический терм переменной  $y_{pg}^{l+1}$  (значения вида: «высокий», «выше  
 среднего», «ниже среднего» и др.);  $\tilde{B}$  – нечеткое подмножество множества  
 $S_p^l \subset PA \times PB$ ,  $S_p^l = \{s_p^{(l)1} \dots s_p^{(l)q} \dots s_p^{(l)u}\}$ ,  $q = \overline{1, u}$ ;  $S_p^l$  – терм-множество выходной  
 переменной  $y_p^l$ ;  $s_p^{(l)q}$  –  $q$ -й лингвистический терм переменной  $y_p^l$  (значения вида:  
 «высокий», «выше среднего», «ниже среднего» и др.);  $\circ$  – символ макси-минной



композиции Л. Заде;  $\tilde{R}$  – нечеткое отношение  $PA \times PB$  в виде управляющих правил «Если <посылка правила>, то <заключение правила>» (приложение В), фиксирующее сам факт отношения и степень его выполнения. Совокупность управляющих правил (нечеткая база знаний), является формализацией качественного описания процедурных знаний. Совокупность правил, устанавливающих причинно-следственные связи между значениями из множеств  $X_p^{l+1}, Y_p^{l+1}$  и выходной переменной  $y_p^l$ , построенных при помощи логических операций  $\cap$  («и») и  $\cup$  («или») имеет вид:

$$\bigcup_{r=1}^{v_q} \left[ \bigcap_{f=1}^h (x_{pf}^{l+1} = t_{pf}^{(l+1)d}) \bigcap_{g=1}^z (y_{pg}^{l+1} = s_{pg}^{(l+1)k}), w_{qr}^{<SP>} \right] \rightarrow y_p^l = s_p^{(l)q}, q = \overline{1, u}, \quad (3.38)$$

где  $v_q$  – количество правил, определяющих значение выходной переменной (терм)  $s_p^{(l)q}$ ;  $w_{qr}^{<SP>}$  – весовые коэффициенты  $r$ -го правила для значений  $s_p^{(l)q}$ .

Уравнение (3.38) в форме записи функций принадлежности принимает следующий вид:

$$\mu_{sp}^{(l)q}(X^{<P>}) = \bigvee_{r=1}^{v_q} [w_{qr}^{<SP>} \cdot (\mu_{tp}^{(l)f}(x_{pf}^{l+1}), \mu_{sp}^{(l+1)k}(X^{<PY>}))], \quad q = \overline{1, u}, \quad (3.39)$$

где:  $\wedge(\vee)$  – символ логического минимума (максимума);  $X^{<P>}$  – множество входных переменных, входящих в структуру нечеткой модели решения подзадачи  $p$ ; соответствующие части, обозначенные «<...>»,  $X^{<PY>}$  – множество входных переменных необходимых для решения задачи иерархии декларативной базы знаний. Выражение (3.39) определяет нечеткое множество выходной переменной  $y_p^l$ , характеризующее результат подзадачи  $p$ :

$$\tilde{S}_p^l = \left\{ \frac{\mu_{sp}^{(l)1}(X^{<P>})}{s_p^{(l)1}}, \frac{\mu_{sp}^{(l)2}(X^{<P>})}{s_p^{(l)2}}, \dots, \frac{\mu_{sp}^{(l)u}(X^{<P>})}{s_p^{(l)u}} \right\}, \quad (3.40)$$

где  $s_p^{(l)1}, s_p^{(l)2}, \dots, s_p^{(l)u}$  – носители, нечеткие термы, составляющие терм-множество  $S_p^l$ . Нечеткое множество, характеризующее результат решения подзадачи – для переменной  $y_p^l$  на период эксплуатации принимает вид:

$$\tilde{C}_p = \left\{ \frac{\mu_{c1}(X^{<P>})}{c_1}, \frac{\mu_{c2}(X^{<P>})}{c_2}, \frac{\mu_{c3}(X^{<P>})}{c_3}, \frac{\mu_{c4}(X^{<P>})}{c_4} \right\}, \quad (3.41)$$

а нечеткое множество переменной  $y$  (итог комплексной оценки конструкции):

$$\tilde{C} = \left\{ \frac{\mu_{c1}(X)}{c_1}, \frac{\mu_{c2}(X)}{c_2}, \frac{\mu_{c3}(X)}{c_3}, \frac{\mu_{c4}(X)}{c_4} \right\}. \quad (3.42)$$

Для перехода к нечеткому множеству на носителе  $[\underline{y}, \bar{y}] = [0; 5]$  выполняются операции импликации и агрегирования. При решении всей задачи, в результате логического вывода по  $j$ -му правилу базы знаний о техническом состоянии параметра  $y$  получается нечеткое значение выходной переменной:

$$\tilde{c}_j^* = \text{imp}(\tilde{c}_j, \mu_{c_j}(X^*)), \quad j = \overline{1, 4}, \quad (3.43)$$

где  $\text{imp}$  – импликация, реализуемая операцией минимума, т. е. срезанием функции принадлежности  $\mu_{c_j}(y)$  по уровню  $\mu_j(X^*)$ . Математическая запись нечеткого значения выходной переменной  $y$  принимает вид:

$$\tilde{c}_j^* = \int_{y \in [0; 5]} \min(\mu_{c_j}(X^*), \mu_{c_j}(y)) / y. \quad (3.44)$$

Четкое (числовое) значение технического состояния конструкции, соответствующее входному вектору, определяется с помощью операции дефаззификации, выполняемой по наиболее подходящему для данной задачи – методу «центра тяжести».

**Пример 4.** Рассмотрим зависимость между переменными  $x_{1211ns}$  («Результат освидетельствования коррозии арматуры»),  $x_{1212ns}$  («Результат измерения остаточной площади сечения арматуры») и переменной –  $y_{121ns}$  («Контроль коррозии арматуры»). Отметим, что  $x_{1211ns}$  и  $x_{1212ns}$  – входные

переменные, а  $y_{121ns}$  – выходная переменная. Каждое терм-множество входных переменных  $x_{1211ns}$ ,  $x_{1212ns}$  состоит из 4-х лингвистических оценок. Терм-множество выходной переменной «Контроль коррозии арматуры»  $S_{121}$  назначим из аналогичных термов: «высокий», «выше среднего», «ниже среднего» и «низкий»  $s_{121ns}^q$ ,  $q = \text{В, ВС, НС, Н}$  по аналогии с количеством технических состояний строительных конструкций [5]. Указанная зависимость  $y_{121ns} = f(x_{1211ns}, x_{1212ns})$  может быть описана нечеткой базой знаний, состоящей из 16 правил. Фрагмент базы знаний переменной  $y_{121ns}$ , включающей первые четыре (самые простые) правила имеет следующий вид:

*Если  $x_{1211ns} = \text{«высокий»}$  и  $x_{1212ns} = \text{«высокий»}$ ,*  
*то  $y_{121ns} = \text{«высокий»}$ , или;*  
*если  $x_{1211ns} = \text{«высокий»}$  и  $x_{1212ns} = \text{«выше среднего»}$ ,*  
*то  $y_{121ns} = \text{«выше среднего»}$ , или;*  
*если  $x_{1211ns} = \text{«высокий»}$  и  $x_{1212ns} = \text{«ниже среднего»}$ ,*  
*то  $y_{121ns} = \text{«ниже среднего»}$ , или;*  
*если  $x_{1211ns} = \text{«высокий»}$  и  $x_{1212ns} = \text{«низкий»}$ ,*  
*то  $y_{121ns} = \text{«ниже среднего»}$ , или...*

Представленную запись этих и остальных двенадцати правил удобнее отобразить в таблице – см. таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – Нечеткая база знаний  $y_{121ns} = f(x_{1211ns}, x_{1212ns})$

| Номер правила, $j$ | Если         |              | То          |
|--------------------|--------------|--------------|-------------|
|                    | $x_{1211ns}$ | $x_{1212ns}$ | $y_{121ns}$ |
| 1                  | В            | В            | В           |
| 2                  | В            | ВС           | ВС          |
| 3                  | В            | НС           | НС          |
| 4                  | В            | Н            | НС          |
| 5                  | ВС           | В            | ВС          |
| 6                  | ВС           | ВС           | ВС          |
| 7                  | ВС           | НС           | НС          |
| 8                  | ВС           | Н            | НС          |

| Номер правила, $j$ | Если         |              | То          |
|--------------------|--------------|--------------|-------------|
|                    | $x_{1211ns}$ | $x_{1212ns}$ | $y_{121ns}$ |
| 9                  | НС           | В            | ВС          |
| 10                 | НС           | ВС           | НС          |
| 11                 | НС           | НС           | НС          |
| 12                 | НС           | Н            | Н           |
| 13                 | Н            | В            | НС          |
| 14                 | Н            | ВС           | НС          |
| 15                 | Н            | НС           | Н           |
| 16                 | Н            | Н            | Н           |

Функций принадлежности нечетких термов переменной «Результат освидетельствования коррозии арматуры» ( $x_{1211ns}$ ) имеют следующие параметрические описания:

$$\mu_{t_{1211ns}^B}(x_{1211ns}) = \begin{cases} 1, & x_{1211ns} = 1 \\ 0,819, & x_{1211ns} = 2 \\ 0,575, & x_{1211ns} = 3 \\ 0,015, & x_{1211ns} = 4 \\ 0, & x_{1211ns} = 5 \end{cases}, \mu_{t_{1211ns}^{BC}}(x_{1211ns}) = \begin{cases} 0,676, & x_{1211ns} = 1 \\ 1, & x_{1211ns} = 2 \\ 0,905, & x_{1211ns} = 3 \\ 0,335, & x_{1211ns} = 4 \\ 0,011, & x_{1211ns} = 5 \end{cases}$$

$$\mu_{t_{1211ns}^{HC}}(x_{1211ns}) = \begin{cases} 0,148, & x_{1211ns} = 1 \\ 0,781, & x_{1211ns} = 2 \\ 1, & x_{1211ns} = 3 \\ 0,8, & x_{1211ns} = 4 \\ 0,165, & x_{1211ns} = 5 \end{cases}, \mu_{t_{1211ns}^H}(x_{1211ns}) = \begin{cases} 0, & x_{1211ns} = 1 \\ 0, & x_{1211ns} = 2 \\ 0,412, & x_{1211ns} = 3 \\ 0,781, & x_{1211ns} = 4 \\ 1, & x_{1211ns} = 5 \end{cases}.$$

Функции принадлежности термов переменной «Результат измерения остаточной площади сечения арматуры» ( $x_{1212ns}$ ):

$$\mu_{t_{1212ns}^B}(x_{1212ns}) = \begin{cases} 1, & x_{1212ns} = 0 \\ 0, & x_{1212ns} > 0 \end{cases},$$

$$\mu_{t_{1212ns}^{BC}}(x_{1212ns}) = \begin{cases} 0, & x_{1212ns} = 0 \\ \frac{10 - x_{1212ns}}{10}, & 0 < x_{1212ns} < 10 \\ 0, & 10 \leq x_{1212ns} \leq 100 \end{cases},$$

$$\mu_{t_{1212ns}}^{HC}(x_{1212ns}) = \begin{cases} 0, & x_{1212ns} = 0 \text{ или } x_{1212ns} \geq 20 \\ \frac{x_{1212ns}}{10}, & 0 < x_{1212ns} \leq 10 \\ \frac{20 - x_{1212ns}}{20 - 10}, & 10 < x_{1212ns} < 20 \end{cases},$$

$$\mu_{t_{1212ns}}^H(x_{1212ns}) = \begin{cases} 0, & x_{1212ns} \leq 10 \\ \frac{x_{1212ns} - 10}{20 - 10}, & 10 < x_{1212ns} < 20 \\ 1, & x_{1212ns} \geq 20 \end{cases}.$$

Графики функций принадлежности термов переменных «Результат освидетельствования коррозии арматуры» и «Результат измерения остаточной площади сечения арматуры» представлены, соответственно, на рисунках 3.15 и 3.16.

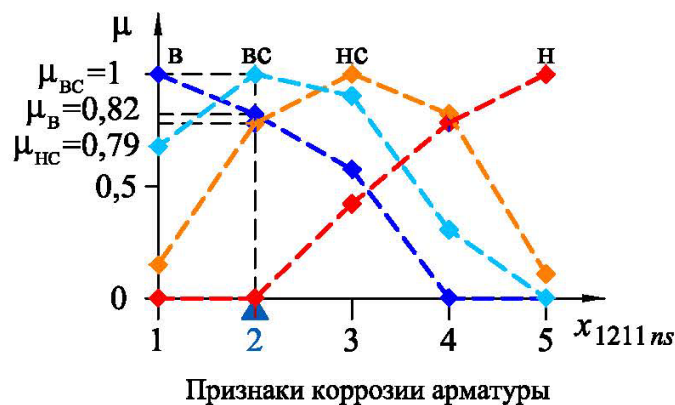


Рисунок 3.15 – Графики функций принадлежности термов переменной  $x_{1211ns}$  «Результат освидетельствования коррозии арматуры» с отображением степеней принадлежности к термам при входе, равном 2 (второй класс признаков повреждения коррозией)

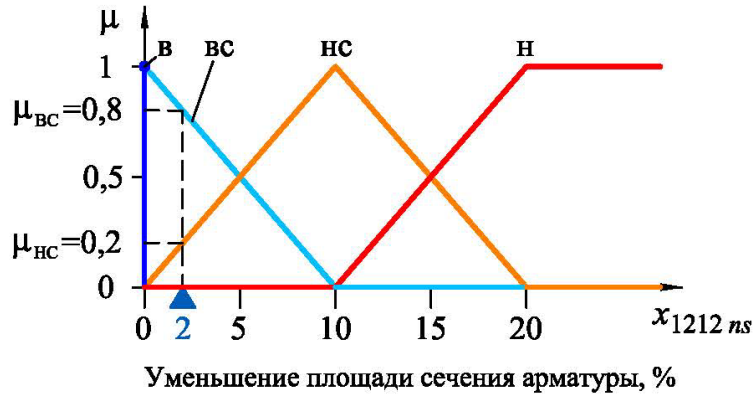


Рисунок 3.16 – Графики функций принадлежности термов переменной  $x_{1212 ns}$  «Результат измерения остаточной площади сечения арматуры» с отображением степеней принадлежности к термам при входе, равном 2 (уменьшение сечения на 2 %)

Функции принадлежности термов переменной «Результат освидетельствования коррозии арматуры» ( $x_{1211 ns}$ ):

Расчет степеней выполнения посылок, заключений правил и результатов нечеткого вывода при значениях входов  $x_{1211 ns} = 2$  (второй класс признаков) и  $x_{1212 ns} = 2\%$  имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \mu_{s_{121 ns}}^B(x_{1211 ns}, x_{1212 ns}) &= [w_1 \cdot (\mu_{t_{1211 ns}}^B(x_{1211 ns}) \wedge \mu_{t_{1212 ns}}^B(x_{1212 ns}))] = [1 \cdot (0,819 \wedge 0)] = 0 \\
 \mu_{s_{121 ns}}^{BC}(x_{1211 ns}, x_{1212 ns}) &= [w_2 \cdot (\mu_{t_{1211 ns}}^{BC}(x_{1211 ns}) \wedge \mu_{t_{1212 ns}}^{BC}(x_{1212 ns}))] \vee [w_5 \cdot (\mu_{t_{1211 ns}}^{BC}(x_{1211 ns}) \wedge \mu_{t_{1212 ns}}^B(x_{1212 ns}))] \vee \\
 &\vee [w_6 \cdot (\mu_{t_{1211 ns}}^{BC}(x_{1211 ns}) \wedge \mu_{t_{1212 ns}}^{BC}(x_{1212 ns}))] \vee [w_9 \cdot (\mu_{t_{1211 ns}}^{HC}(x_{1211 ns}) \wedge \mu_{t_{1212 ns}}^B(x_{1212 ns}))] = \\
 &= [1 \cdot (0,819 \wedge 0,8)] \vee [1 \cdot (1 \wedge 0)] \vee [1 \cdot (1 \wedge 0,8)] \vee [1 \cdot (0,781 \wedge 0)] = \\
 &= 0,8 \vee 0 \vee 0,8 \vee 0 = 0,8. \\
 \mu_{s_{121 ns}}^{HC}(x_{1211 ns}, x_{1212 ns}) &= [w_3 \cdot (\mu_{t_{1211 ns}}^B(x_{1211 ns}) \wedge \mu_{t_{1212 ns}}^{HC}(x_{1212 ns}))] \vee \\
 &\vee [w_4 \cdot (\mu_{t_{1211 ns}}^B(x_{1211 ns}) \wedge \mu_{t_{1212 ns}}^H(x_{1212 ns}))] \vee \\
 &\vee [w_7 \cdot (\mu_{t_{1211 ns}}^{BC}(x_{1211 ns}) \wedge \mu_{t_{1212 ns}}^{HC}(x_{1212 ns}))] \vee [w_8 \cdot (\mu_{t_{1211 ns}}^{BC}(x_{1211 ns}) \wedge \mu_{t_{1212 ns}}^H(x_{1212 ns}))] \vee \\
 &\vee [w_{10} \cdot (\mu_{t_{1211 ns}}^{HC}(x_{1211 ns}) \wedge \mu_{t_{1212 ns}}^{BC}(x_{1212 ns}))] \vee [w_{11} \cdot (\mu_{t_{1211 ns}}^{HC}(x_{1211 ns}) \wedge \mu_{t_{1212 ns}}^{HC}(x_{1212 ns}))] \vee \\
 &\vee [w_{13} \cdot (\mu_{t_{1211 ns}}^H(x_{1211 ns}) \wedge \mu_{t_{1212 ns}}^B(x_{1212 ns}))] \vee [w_{14} \cdot (\mu_{t_{1211 ns}}^H(x_{1211 ns}) \wedge \mu_{t_{1212 ns}}^{BC}(x_{1212 ns}))] = \\
 &= [1 \cdot (0,819 \wedge 0,2)] \vee [1 \cdot (0,819 \wedge 0)] \vee [1 \cdot (1 \wedge 0,2)] \vee [1 \cdot (1 \wedge 0)] \vee \\
 &\vee [1 \cdot (0,2 \wedge 1)] \vee [1 \cdot (0,782 \wedge 0,2)] \vee [1 \cdot (0 \wedge 0)] \vee [1 \cdot (0 \wedge 0,8)] = \\
 &= 0,2 \vee 0 \vee 0,2 \vee 0 \vee 0,2 \vee 0 \vee 0 \vee 0 = 0,2.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{s_{121ns}^H}(x_{1211ns}, x_{1212ns}) &= [w_{12} \cdot (\mu_{t_{1211ns}^{HC}}(x_{1211ns}) \wedge \mu_{t_{1212ns}^H}(x_{1212ns}))] \vee \\ &\vee [w_{15} \cdot (\mu_{t_{1211ns}^H}(x_{1211ns}) \wedge \mu_{t_{1212ns}^{HC}}(x_{1212ns}))] \vee [w_{16} \cdot (\mu_{t_{1211ns}^H}(x_{1211ns}) \wedge \mu_{t_{1212ns}^H}(x_{1212ns}))] = \\ &= [1 \cdot (0, 782 \wedge 0)] \vee [1 \cdot (0 \wedge 0, 2)] \vee [1 \cdot (0 \wedge 0)] = 0 \vee 0 \vee 0 = 0. \end{aligned}$$

Результат нечеткого вывода представим в виде:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{121ns} &= \left( \frac{\mu_{s_{121ns}^B}(x_{1211ns}, x_{1212ns})}{s_{121ns}^B}, \frac{\mu_{s_{121ns}^{BC}}(x_{1211ns}, x_{1212ns})}{s_{121ns}^{BC}}, \frac{\mu_{s_{121ns}^{HC}}(x_{1211ns}, x_{1212ns})}{s_{121ns}^{HC}}, \frac{\mu_{s_{121ns}^H}(x_{1211ns}, x_{1212ns})}{s_{121ns}^H} \right) = \\ &= \left( \frac{0}{s_{121ns}^B}, \frac{0,8}{s_{121ns}^{BC}}, \frac{0,2}{s_{121ns}^{HC}}, \frac{0}{s_{121ns}^H} \right). \end{aligned}$$

Приведение результатов нечеткого вывода к нечеткому множеству технических состояний  $S$ , носителями которого являются нечеткие числа ( $c_1$  – *нормативное техническое состояние*,  $c_2$  – *работоспособное техническое состояние*,  $c_3$  – *ограниченно работоспособное техническое состояние*,  $c_4$  – *аварийное техническое состояние*), позволяет представить результат нечеткого вывода в следующем виде:

$$\tilde{y}_{121} = \left( \frac{0}{s_{121ns}^B}, \frac{0,8}{s_{121ns}^{BC}}, \frac{0,2}{s_{121ns}^{HC}}, \frac{0}{s_{121ns}^H} \right) = \left( \frac{0}{c_1}, \frac{0,8}{c_2}, \frac{0,2}{c_3}, \frac{0}{c_4} \right).$$

В таком случае, в результате логического вывода получим следующие нечеткие значения выходной переменной  $y_{121ns}$ :

$$\begin{aligned} c_1^* &= \int_{y \in [0;5]} \frac{\min(\mu_{s_{121ns}^B}(x_{1211ns}, x_{1212ns}), \mu_{c_1}(y))}{y} = \int_{y \in [0;5]} \frac{\min((0), \mu_{c_1}(y))}{y}, \\ c_2^* &= \int_{y \in [0;5]} \frac{\min(\mu_{s_{121ns}^{BC}}(x_{1211ns}, x_{1212ns}), \mu_{c_2}(y))}{y} = \int_{y \in [0;5]} \frac{\min((0,8), \mu_{c_2}(y))}{y}, \end{aligned}$$

$$c_3^* = \int_{y \in [0;5]} \frac{\min(\mu_{s_{121ns}}^{\text{HC}}(x_{1211ns}, x_{1212ns}), \mu_{c_3}(y))}{y} dy = \int_{y \in [0;5]} \frac{\min((0, 2), \mu_{c_3}(y))}{y} dy,$$

$$c_4^* = \int_{y \in [0;5]} \frac{\min(\mu_{s_{121ns}}^{\text{HC}}(x_{1211ns}, x_{1212ns}), \mu_{c_4}(y))}{y} dy = \int_{y \in [0;5]} \frac{\min((0), \mu_{c_4}(y))}{y} dy.$$

Результат логического вывода по всей базе знаний зависимости  $y_{121ns} = f(x_{1211ns}, x_{1212ns})$  находим агрегированием:

$$\tilde{y}_{121ns}^* = \text{agg}(c_1^*, c_2^*, c_3^*, c_4^*).$$

Через выполнение дефаззификации нечеткого множества  $\tilde{y}_{121ns}$  по методу центра тяжести, определяется четкое значение  $y_{121ns}$  выхода, соответствующее ее входным значениям:

$$y_{121ns} = \frac{\int_0^5 y \cdot \mu_{\tilde{y}_{121ns}}^*(y) dy}{\int_0^5 \mu_{\tilde{y}_{121ns}}^*(y) dy} = 2,24. \quad (3.45)$$

Четкое значение категории  $y_{121ns} = 2,24$  находится между «точками перехода» работоспособного технического состояния – интервал  $[1,5; 2,5]$ , что указывает на принадлежность результата решения задачи к этой категории. Получена важная информация и о том, что значение результата смещено в сторону ограниченно работоспособного технического состояния (ближе к точке перехода  $y = 2,5$ ).

На рисунках 3.17 и 3.18 представлены графические отображения процедур, соответственно, импликации и агрегирования в нечетком выводе по базе знаний зависимости  $y_{121ns} = f(x_{1211ns}, x_{1212ns})$ .



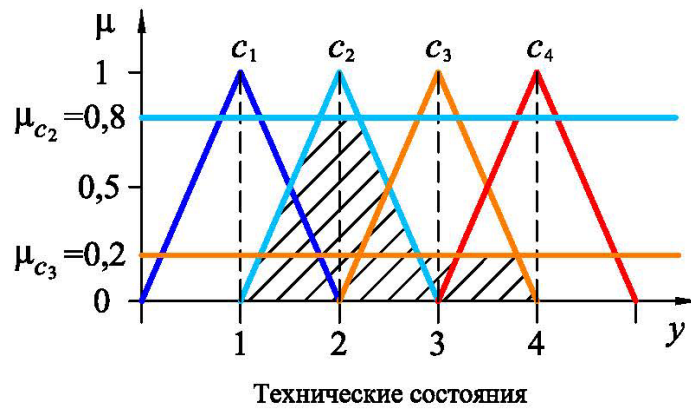


Рисунок 3.17 – Отображение импликации в нечетком выводе по базе знаний зависимости  $y_{121ns} = f(x_{1211ns}, x_{1212ns})$

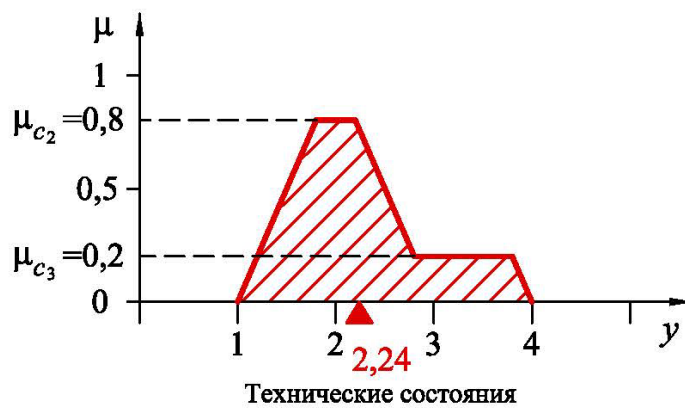


Рисунок 3.18 – Отображение агрегирования и дефаззификации в нечетком выводе по базе знаний зависимости  $y_{121ns} = f(x_{1211ns}, x_{1212ns})$

### 3.4 Выводы по главе 3

На основании исследований, изложенных в третьей главе, сделаны выводы:

- Аппарат теории нечетких множеств, позволяет формализовать и обрабатывать разнородную информацию, содержащуюся в описании признаков технического состояния конструкций.
- Теория нечетких множеств и нечеткая логика позволяют создавать математические модели для идентификации технического состояния конструкций

зданий и сооружений в условиях многофакторности и неопределенности признаков технических состояний.

- Разработаны методы формализации входных количественных и качественных контролируемых параметров технического состояния строительных конструкций, позволяющие с учетом заданного количества лингвистических термов строить их функции принадлежности.

- Для описания качественных признаков технического состояния разработан подход, использующий комбинацию методов Т. Саати, *Laarhoven P.J.M* и *Pedrycz W.A.*, который позволяет учесть нечеткость ответов и разрабатывать более адекватные математические модели эвристических знаний для исследуемой предметной области.

- Предложены и обоснованы функции принадлежности термов выходной лингвистической переменной в виде треугольных нечетких чисел (треугольных функций принадлежности) для вычисления результатов оценки технического состояния конструкции.

- Обосновано применение, адаптирована и применена математическая модель нечеткого логического вывода Мамдани в вычислении конкретного (четкого) значения категории технического состояния конструкции.

## **4 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМОЙ**

Широкое внедрение интеллектуальных экспертных систем должно обеспечиваться возможностью легкого изменения и дополнения баз данных и знаний. Применение языка, удобного для создания, чтения и модификаций программы, вольность в создании разметки в соответствии с потребностями экспертов в сфере обследования конструкций зданий и сооружений является одним из важнейших условий существования экспертной системы. Распространенным средством, удовлетворяющим данным требованиям, является грамматика, созданная на базе формата *XML*. Реализация математических моделей для идентификации категории технического состояния строительных конструкций на основе нечетких баз знаний в программной среде *Microsoft Excel* на базе *XML*, доказала пригодность этого инструмента к выполнению численных процедур нечеткой экспертной системы.

### **4.1 Обоснование применения инструмента реализации математической модели**

Успех математической модели – востребованность применения при создании как сложных, так и простых программ. Невозможно создать программу, которая удовлетворяла бы всем потребностям пользователя. Существует много ситуаций, когда пользователю необходимо внести доработку в программу или создать модуль для решения узких, интересующих только его задач. Принимая данный факт во внимание, разработка математической модели идентификации категории технического состояния была нацелена на использование максимально доступных для инженера средств реализации экспертных систем.

В настоящее время для разработки экспертных систем существует большое множество разнообразных программ и программных комплексов. Среди них: интегрированная производственная система *CLIPS*, оболочка для управления нечеткими фактами и правилами *FuzzyCLIPS*, оболочка экспертной системы *GURU*, оболочка для гибридных экспертных систем *FLEX*, среда для технических вычислений *MatLab* и др. Каждый из этих инструментов имеет свою специфику и особенности, требуя определенных навыков работы и наличия соответствующего программного продукта на компьютере. Однако в рамках исследования для выполнения численных процедур на ЭВМ, для реализации математических моделей для идентификации категории технического состояния строительных конструкций на основе нечетких баз знаний, выбран табличный процессор *Microsoft Excel* [153, 154], входящий в пакет программ *Microsoft Office*.

*Microsoft Excel* – является весьма доступным программным комплексом, обеспечивающим пользователю возможность самостоятельно реализовывать механизмы решений математических задач, не прибегая к услугам программиста. Простота создания программы и доказанная возможность реализации нечеткой экспертной системы открывают новые возможности для инженеров-обследователей в создании собственных экспертных систем, создании личных баз знаний и библиотек программ, ориентированных на конкретные задачи диагностики конструкций. В формализованном виде описание навигационной структуры приложение *Microsoft Excel* представляет собой файл в формате *XML*.

*XML* является расширяемым языком с простым синтаксисом. Базирование *XML*, на кодировках международного стандарта кодирования знаков *Unicode*, применяемых в современных форматах, позволяет обрабатывать, изменять данные в любых других системах вне зависимости от клиентской платформы или операционной системы. Кроме того *XML* – расширяемый язык, разработчик ограничен лишь синтаксическими правилами языка.

## 4.2 Описание программы для идентификации категории технического состояния железобетонной изгибаемой конструкции

Для демонстрации возможности реализации предлагаемых в диссертационном исследовании математических моделей идентификации категории технического состояния строительных конструкций в вычислительных комплексах программ создана экспертная система «КТС-ИЖБК» [155], зарегистрированная в Реестре программ для ЭВМ (приложения Г, Д). Программа позволяет получать альтернативные решения, просматривать, контролировать и анализировать (введенные в программу) результаты обследования (значения контролируемых параметров) оцениваемой конструкции (рисунок 4.1). Все элементы системы нечеткого логического вывода (фаззификатор, нечеткая база знаний, машина нечеткого логического вывода, дефаззификатор) реализованы *Microsoft Excel* (рисунки 4.2–4.5).

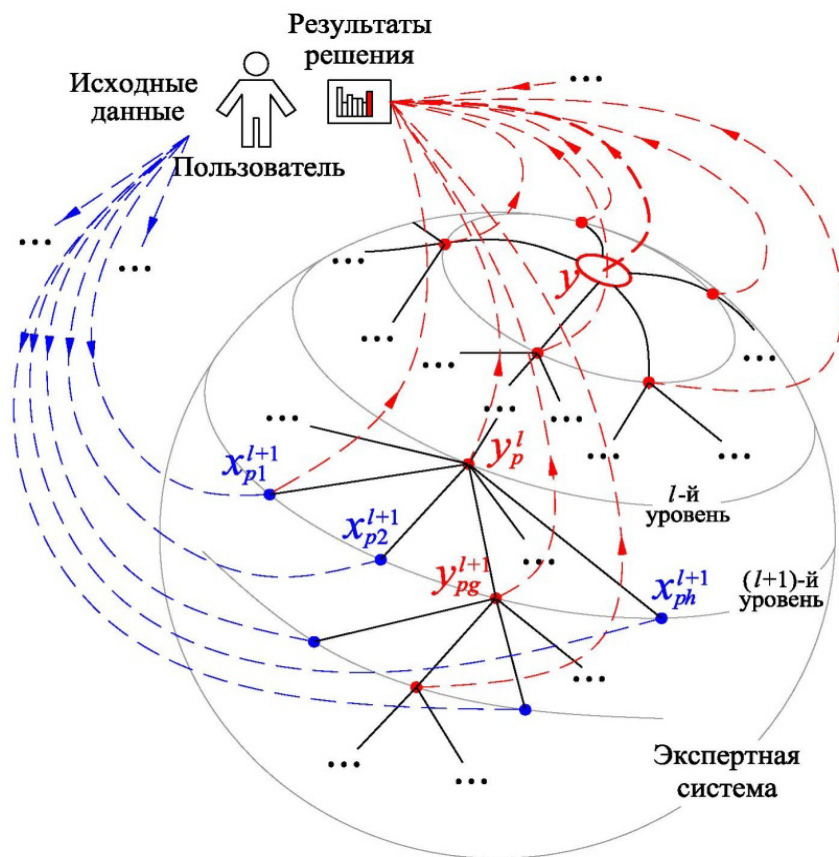


Рисунок 4.1 – Концепция работы с экспертной системой для идентификации категории технического состояния строительных конструкций

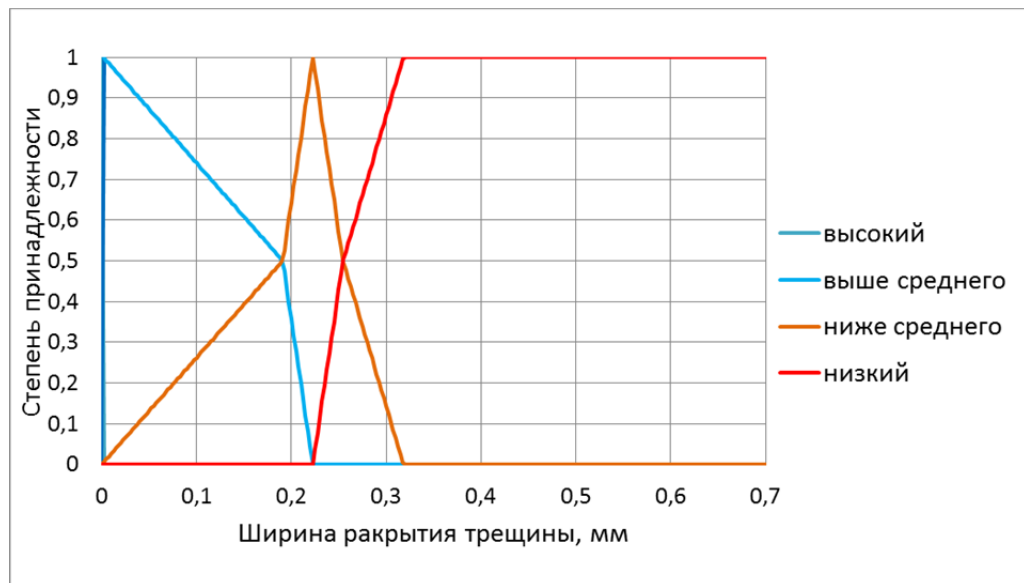


Рисунок 4.2 – Пример реализации функций принадлежности термов переменной  $x_{1111ns}$  в составе фаззификатора экспертной системы КТС-ИЖБК

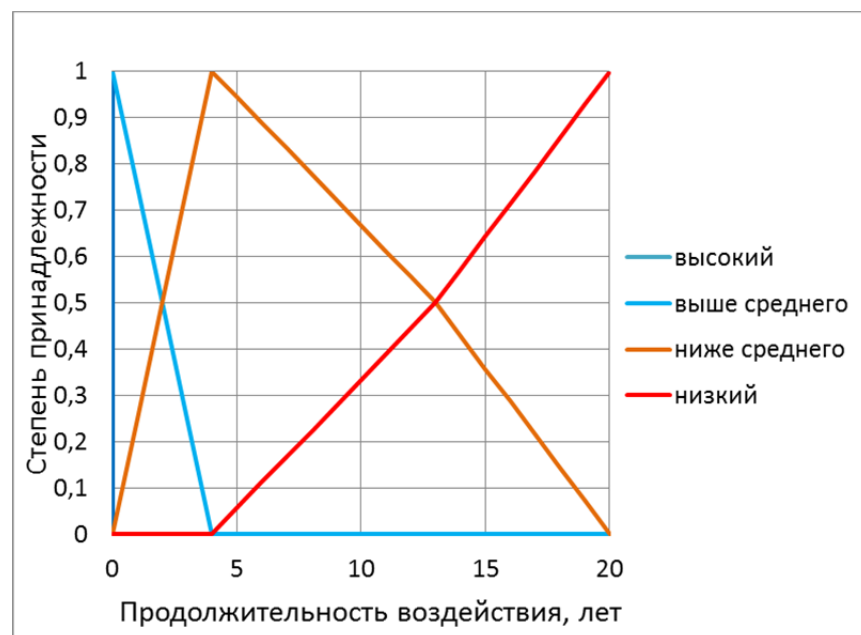


Рисунок 4.3 – Пример реализации функций принадлежности термов переменной  $x_{13112ns}$  в составе фаззификатора экспертной системы «КТС-ИЖБК»

|     | A        | B   | C   | D   | E      | F       | G       | H       | I    | J   | K       | L    | M       | N   | O    | P    | Q       | R  | S  | T       | U          | V         |
|-----|----------|-----|-----|-----|--------|---------|---------|---------|------|-----|---------|------|---------|-----|------|------|---------|----|----|---------|------------|-----------|
| 103 |          | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 1       | 0       | 0    | 0   | 0       | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0       | 0  | 0  | 0       | 0          | 0,15212   |
| 104 | 0        | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 1       | 0       | 0    | 0   | 0       | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0       | 0  | 0  | 0       | 0          | 0,15212   |
| 105 | 0        | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0       | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0       | 0  | 0  | 0       | 0          | 0,15212   |
| 106 |          |     |     |     |        |         |         |         |      |     |         |      |         |     |      |      |         |    |    |         |            |           |
| 107 |          |     |     |     |        |         |         |         |      |     |         |      |         |     |      |      |         |    |    |         |            |           |
| 108 |          |     |     |     |        |         |         |         |      |     |         |      |         |     |      |      |         |    |    |         |            |           |
| 109 |          |     |     |     |        |         |         |         |      |     |         |      |         |     |      |      |         |    |    |         |            |           |
| 110 |          |     |     |     |        |         |         |         |      |     |         |      |         |     |      |      |         |    |    |         |            |           |
| 111 | y11      | y12 | y13 | x11 | y1     | w       | y1(w)   |         |      |     | y11     | y12  | y13     | x11 | y1   | w    | y1(w)   |    |    | y11     | y12        | y13       |
| 112 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 1       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 113 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 114 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 115 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 116 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 117 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 118 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 119 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 120 |          |     |     |     |        |         |         |         |      |     |         |      |         |     |      |      |         |    |    |         |            |           |
| 121 | y11      | y12 | y13 | x11 | y1     | w       | y1(w)   |         |      |     | y11     | y12  | y13     | x11 | y1   | w    | y1(w)   |    |    | y11     | y12        | y13       |
| 122 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 1       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 123 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 124 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 125 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 126 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 127 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 128 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 129 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 130 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 131 |          |     |     |     |        |         |         |         |      |     |         |      |         |     |      |      |         |    |    |         |            |           |
| 132 | y11      | y12 | y13 | x11 | y1     | w       | y1(w)   |         |      |     | y11     | y12  | y13     | x11 | y1   | w    | y1(w)   |    |    | y11     | y12        | y13       |
| 133 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 1       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 134 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 135 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 136 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 137 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 138 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 139 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 140 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 141 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 142 |          |     |     |     |        |         |         |         |      |     |         |      |         |     |      |      |         |    |    |         |            |           |
| 143 | y11      | y12 | y13 | x11 | y1     | w       | y1(w)   |         |      |     | y11     | y12  | y13     | x11 | y1   | w    | y1(w)   |    |    | y11     | y12        | y13       |
| 144 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 1       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 145 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 146 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 147 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 148 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 149 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 150 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 151 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 152 | 0,806731 | 0   | 0   | 0   | 0      | 0       | 0       | 0       | 0    | 0   | 0,80673 | 0    | 0,95001 | 0   | 0    | 0    | 0,80673 | 0  | 0  | 0,80673 | 0          | 0,15212   |
| 153 |          |     |     |     |        |         |         |         |      |     |         |      |         |     |      |      |         |    |    |         |            |           |
| 154 |          |     |     |     |        |         |         |         |      |     |         |      |         |     |      |      |         |    |    |         |            |           |
| 155 |          |     |     |     |        |         |         |         |      |     |         |      |         |     |      |      |         |    |    |         |            |           |
| 156 |          |     |     |     |        |         |         |         |      |     |         |      |         |     |      |      |         |    |    |         |            |           |
| 157 |          |     |     |     |        |         |         |         |      |     |         |      |         |     |      |      |         |    |    |         |            |           |
| И   | 2+       | 3+  | 4+  | 5+  | БЗВ y1 | БЗВ y11 | БЗВ y12 | БЗВ y13 | y111 | y11 | x11     | y122 | y12     | y13 | y131 | y133 | y134    | x1 | x2 | НВЛМ y1 | НВЛМ y13-2 | НВЛМ y13- |

Рисунок 4.4 – Пример реализации базы знаний в экспертной системе «КТС-ИЖБК»

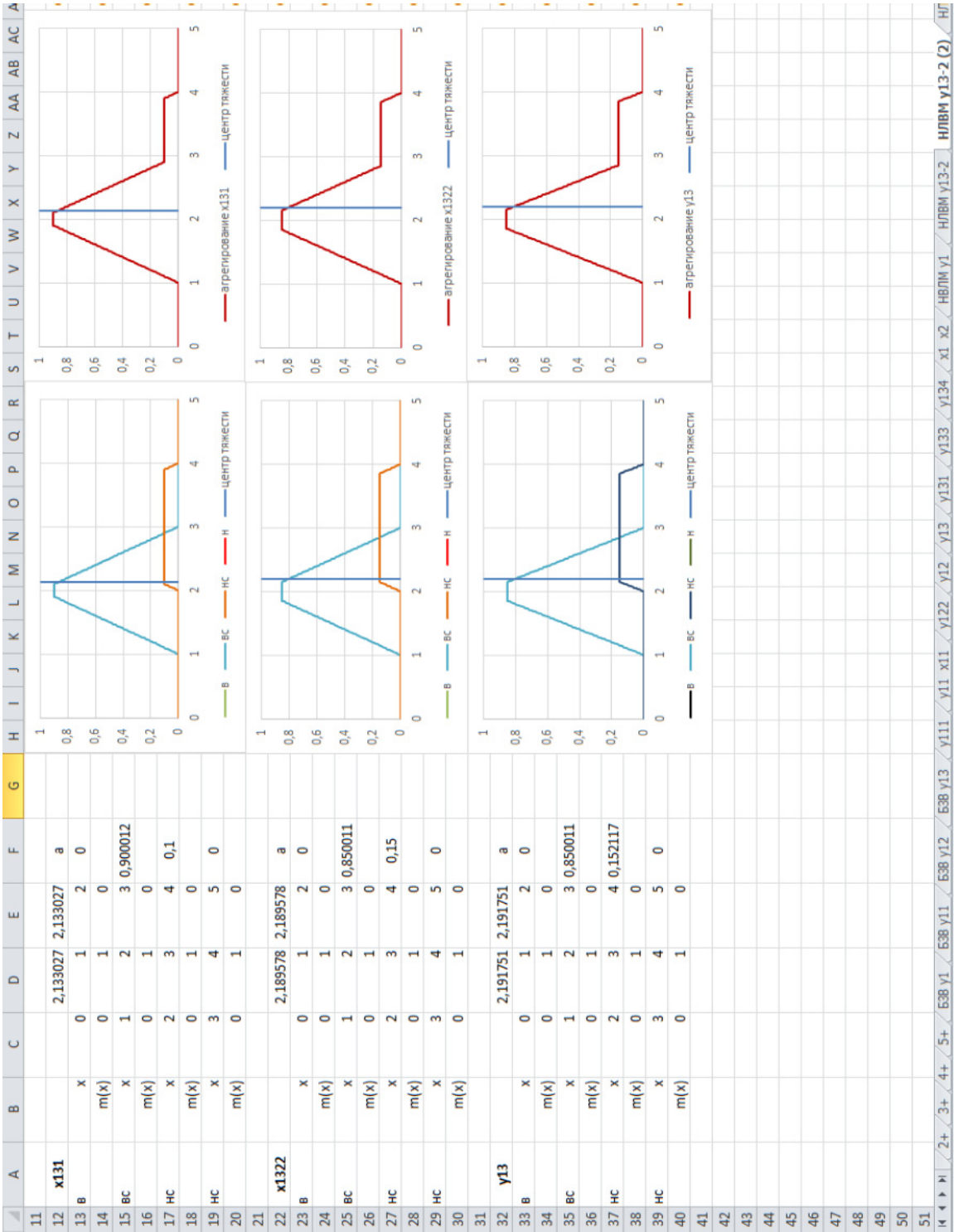


Рисунок 4.5 – Пример реализации дефазификатора в экспертной системе «КТС-ИЖБК»



Экспертная система предназначена для оперативного принятия решений в идентификации категории технического состояния железобетонной изгибаемой конструкции в соответствии с ГОСТ 31937-2011 [5].

Программа способна обработать информацию с 91 контролируемого параметра железобетонного изгибаемого элемента, входящих в состав онтографа, представленного на рисунке 2.2 (из которых почти все представлены лингвистическими переменными), а нечеткая база знаний содержит более 5000 правил.

Экспертная система «КТС-ИЖБК» обеспечивает выполнение следующих функций:

- анализ принадлежности железобетонной изгибаемой конструкции к категории технического состояния непосредственно по каждому введенному значению контролируемых параметров технического состояния;
- анализ принадлежности железобетонной изгибаемой конструкции к категории технического состояния по всем (предусмотренным программой) введенным значениям контролируемых параметров технического состояния (по группам).
- хранение и чтение ранее созданных файлов модели.

Для запуска программы необходимо наличие в персональном компьютере широко применяемой инженерами в работе программы *Microsoft Excel* [156]. При запуске «управляющего» файла «КТС-ИЖБК» появляется окно, представленное на рисунке 4.6. Интерфейс пользователя программы включает кнопки, а также всплывающие информационные окна и раскрывающиеся списки.

|                                                                                                            | A                                                                                                                                                                                                                                                        | B                       | C                                                          | D        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------|----------|
| 1                                                                                                          | КТС-ИЖБК                                                                                                                                                                                                                                                 |                         |                                                            |          |
| 2                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                            |          |
| 3                                                                                                          | 1. ВЫБЕРИТЕ КОНТРОЛИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ                                                                                                                                                                                                                     |                         |                                                            |          |
| 4                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                            |          |
| 5                                                                                                          | <input type="radio"/> Состояние опор <input type="radio"/> Состояние наклонных сечений <input checked="" type="radio"/> Состояние нормальных сечений <input type="radio"/> Состояние закладных деталей и связей <input type="radio"/> Контроль жесткости |                         |                                                            |          |
| 6                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                            |          |
| 7                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                            |          |
| 8                                                                                                          | ОЧИСТИТЬ ВСЕ                                                                                                                                                                                                                                             |                         | Проверка корректности                                      |          |
| 9                                                                                                          | РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО СОСТОЯНИЯ                                                                                                                                                                                                                |                         |                                                            |          |
| 10                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                            |          |
| 11                                                                                                         | СПРАВКА                                                                                                                                                                                                                                                  |                         | ИТОГОВЫЙ РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ КТС                              |          |
| 12                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                            |          |
| 13                                                                                                         | 2. УКАЖИТЕ ЗНАЧЕНИЕ КОНТРОЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА                                                                                                                                                                                                            |                         |                                                            |          |
| 14                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                            |          |
| 15                                                                                                         | № п/п                                                                                                                                                                                                                                                    | Контролируемый параметр | Наименование контролируемого параметра                     | Значение |
| 16                                                                                                         | 1                                                                                                                                                                                                                                                        | X1ns                    | Результат проверки соответствия требованиям к армированию  |          |
| 17                                                                                                         | 2                                                                                                                                                                                                                                                        | X2ns                    | Результат проверки соответствия требованиям к материалам   |          |
| 18                                                                                                         | 3                                                                                                                                                                                                                                                        | X11ns                   | Результат проверочных расчетов                             |          |
| 19                                                                                                         | 4                                                                                                                                                                                                                                                        | X111ns                  | Результат оценки поврежденности сжатой зоны бетона         |          |
| 20                                                                                                         | 5                                                                                                                                                                                                                                                        | X121ns                  | Результат измерения сопротивления арматуры                 |          |
| 21                                                                                                         | 6                                                                                                                                                                                                                                                        | X122ns                  | Результат измерения механического повреждения арматуры     |          |
| 22                                                                                                         | 7                                                                                                                                                                                                                                                        | X131ns                  | Результат измерения механических повреждений бетона        |          |
| 23                                                                                                         | 8                                                                                                                                                                                                                                                        | X1111ns                 | Результат измерения ширины раскрытия нормальных трещин     |          |
| 24                                                                                                         | 9                                                                                                                                                                                                                                                        | X1112ns                 | Результат измерения расстояния между нормальными трещинами |          |
| КТС / Состояние опор / Состояние наклонных сечений / Состояние нормальных сечений / Состояние заклад. дет. |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                            |          |
| Готово                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                            |          |

Рисунок 4.6 – Демонстрация диалогового окна,  
появляющегося при запуске программы «КТС-ИЖБК»

Демонстрация программы при выборе значения из «раскрывающегося списка», позволяющего пользователю выбрать нужное значение, представлена на рисунке 4.7. Демонстрация программы при появлении информационного окна представлена на рисунке 4.8.

Пользователю необходимо последовательно вводить данные, полученные при обследовании строительного элемента (конструкции), для каждого «контролируемого состояния» (подсистема с перечнем соответствующих контролируемых параметров). Предусматривается возможность использования функции «Справка» для просмотра технического руководства пользователя (включающего описание последовательности действий и правил ввода параметров для исключения получения некорректного результата оценки), а

также функции «Проверка корректности» – для выявления некорректных, противоречивых значений контролируемых параметров.

The screenshot displays the KTS-IBBK software interface. At the top, a header bar contains the text "КТС-ИЖБК". Below this, a section titled "1. ВЫБЕРИТЕ КОНТРОЛИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ" (1. SELECT THE STATE TO BE CONTROLLED) contains five radio buttons: "Состояние опор" (Support state), "Состояние наклонных сечений" (State of inclined sections), "Состояние нормальных сечений" (State of normal sections), "Состояние закладных деталей и связей" (State of embedded parts and connections), and "Контроль жесткости" (Stiffness control). The "Состояние нормальных сечений" option is selected. Below the radio buttons are three buttons: "ОЧИСТИТЬ ВСЕ" (Clear all), "Проверка корректности" (Check correctness), and "РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО СОСТОЯНИЯ" (Result of evaluation of intermediate state). A "СПРАВКА" (Help) button is located on the left, and an "ИТОГОВЫЙ РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ КТС" (Final result of KTS evaluation) button is on the right.

Below this section is a section titled "2. УКАЖИТЕ ЗНАЧЕНИЕ КОНТРОЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА" (2. INDICATE THE VALUE OF THE CONTROLLED PARAMETER). This section contains a table with four columns: "№ п/п" (No.), "Контролируемый параметр" (Controlled parameter), "Наименование контролируемого параметра" (Name of the controlled parameter), and "Значение" (Value). The table lists 16 parameters, with the 12th parameter, "X1211ns", selected. A dropdown menu is open for this parameter, showing a list of options: "Результат освидетельствования коррозии арматуры" (Result of inspection of reinforcement corrosion), "1 - поверхность арматуры чистая (при вскрытии);", "2 - локальные участки повреждения арматуры поверхностной коррозией (точки и пятна коррозии);", "3 - сплошная поверхностная коррозия арматуры;", "4 - локальные участки язвенной, пластинчатой коррозии арматуры, растрескивания защитного слоя бетона;", and "5 - пластинчатая коррозия арматуры, растрескивание и выдавливание".

| № п/п | Контролируемый параметр | Наименование контролируемого параметра                                                                | Значение |
|-------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 7     | X131ns                  | Результат измерения механических повреждений бетона                                                   |          |
| 8     | X1111ns                 | Результат измерения ширины раскрытия нормальных трещин                                                |          |
| 9     | X1112ns                 | Результат измерения расстояния между нормальными трещинами                                            |          |
| 10    | X1113ns                 | Класс рабочей арматуры сечений                                                                        |          |
| 11    | X1114ns                 | Предельно-допустимая ширина трещины из условия сохранности арматуры                                   |          |
| 12    | X1211ns                 | Результат освидетельствования коррозии арматуры                                                       |          |
| 13    | X1212ns                 | Результат освидетельствования коррозии арматуры                                                       |          |
| 14    | X1221ns                 | 1 - поверхность арматуры чистая (при вскрытии);                                                       |          |
| 15    | X1311ns                 | 2 - локальные участки повреждения арматуры поверхностной коррозией (точки и пятна коррозии);          |          |
| 16    | X1312ns                 | 3 - сплошная поверхностная коррозия арматуры;                                                         |          |
|       |                         | 4 - локальные участки язвенной, пластинчатой коррозии арматуры, растрескивания защитного слоя бетона; |          |
|       |                         | 5 - пластинчатая коррозия арматуры, растрескивание и выдавливание                                     |          |

Рисунок 4.7 – Демонстрация программы в момент выбора значения качественного контролируемого параметра из «раскрывающегося списка»

На начальном этапе работы экспертной системы, всем контролируемым параметрам присваиваются значения, соответствующие нормативному техническому состоянию (имитируется отсутствие у оцениваемой конструкции дефектов и повреждений). По результатам ответов, пользователь может наблюдать за принадлежностью введенных в систему значений контролируемых параметров конструкции (признаков) к категориям и за изменением категории технического состояния, как промежуточных значений, так и итога (для всей конструкции). Для уточнения параметров повреждений, например, при наличии нормальных трещин в середине пролета балки, система запрашивает более подробную, детальную информацию (расстояние между трещинами, ширину раскрытия трещин, класс арматуры на уровне трещины и др.).

|    | A                                                                                                                                                                                                                                                        | B                       | C                                                         | D                                                                                                                                 |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | КТС-ИЖБК                                                                                                                                                                                                                                                 |                         |                                                           |                                                                                                                                   |
| 2  |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                           |                                                                                                                                   |
| 3  | 1. ВЫБЕРИТЕ КОНТРОЛИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ                                                                                                                                                                                                                     |                         |                                                           |                                                                                                                                   |
| 4  |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                           |                                                                                                                                   |
| 5  | <input type="radio"/> Состояние опор <input type="radio"/> Состояние наклонных сечений <input checked="" type="radio"/> Состояние нормальных сечений <input type="radio"/> Состояние закладных деталей и связей <input type="radio"/> Контроль жесткости |                         |                                                           |                                                                                                                                   |
| 6  |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                           |                                                                                                                                   |
| 7  |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                           |                                                                                                                                   |
| 8  | ОЧИСТИТЬ ВСЕ                                                                                                                                                                                                                                             |                         | Проверка корректности                                     | РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО СОСТОЯНИЯ                                                                                         |
| 9  |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                           |                                                                                                                                   |
| 10 | СПРАВКА                                                                                                                                                                                                                                                  |                         | ИТОГОВЫЙ РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ КТС                             |                                                                                                                                   |
| 11 |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                           |                                                                                                                                   |
| 12 |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                           |                                                                                                                                   |
| 13 | 2. УКАЖИТЕ ЗНАЧЕНИЕ КОНТРОЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА                                                                                                                                                                                                            |                         |                                                           |                                                                                                                                   |
| 14 |                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                           |                                                                                                                                   |
| 15 | № п/п                                                                                                                                                                                                                                                    | Контролируемый параметр | Наименование контролируемого параметра                    | Значение                                                                                                                          |
| 16 | 1                                                                                                                                                                                                                                                        | X1ns                    | Результат проверки соответствия требованиям к армированию |                                                                                                                                   |
| 17 | 2                                                                                                                                                                                                                                                        | X2ns                    | Результат проверки соответствия требованиям к материалам  |                                                                                                                                   |
| 18 | 3                                                                                                                                                                                                                                                        | X11ns                   | Результат проверочных расчетов                            |                                                                                                                                   |
| 19 | 4                                                                                                                                                                                                                                                        | X111ns                  | Результат оценки поврежденности сжатой зоны бетона        |                                                                                                                                   |
| 20 | 5                                                                                                                                                                                                                                                        | X121ns                  | Результат измерения сопротивления арматуры                |                                                                                                                                   |
| 21 | 6                                                                                                                                                                                                                                                        | X122ns                  | Результат измерения механического повреждения арматуры    |                                                                                                                                   |
| 22 | 7                                                                                                                                                                                                                                                        | X131ns                  | Результат измерения механических п                        | Введите значение от 0 до 20 %<br>Снижение восприятия усилий в арматуре, вызванное механическими повреждениями арматурных стержней |
| 23 | 8                                                                                                                                                                                                                                                        | X1111ns                 | Результат измерения ширины раскрытия                      |                                                                                                                                   |
| 24 | 9                                                                                                                                                                                                                                                        | X1112ns                 | Результат измерения расстояния между                      |                                                                                                                                   |
| 25 | 10                                                                                                                                                                                                                                                       | X1113ns                 | Класс рабочей арматуры сечений                            |                                                                                                                                   |
| 26 | 11                                                                                                                                                                                                                                                       | X1114ns                 | Результат измерения ширины трещин                         |                                                                                                                                   |

Готово

Рисунок 4.8 – Демонстрация программы в момент ввода значения количественного контролируемого параметров

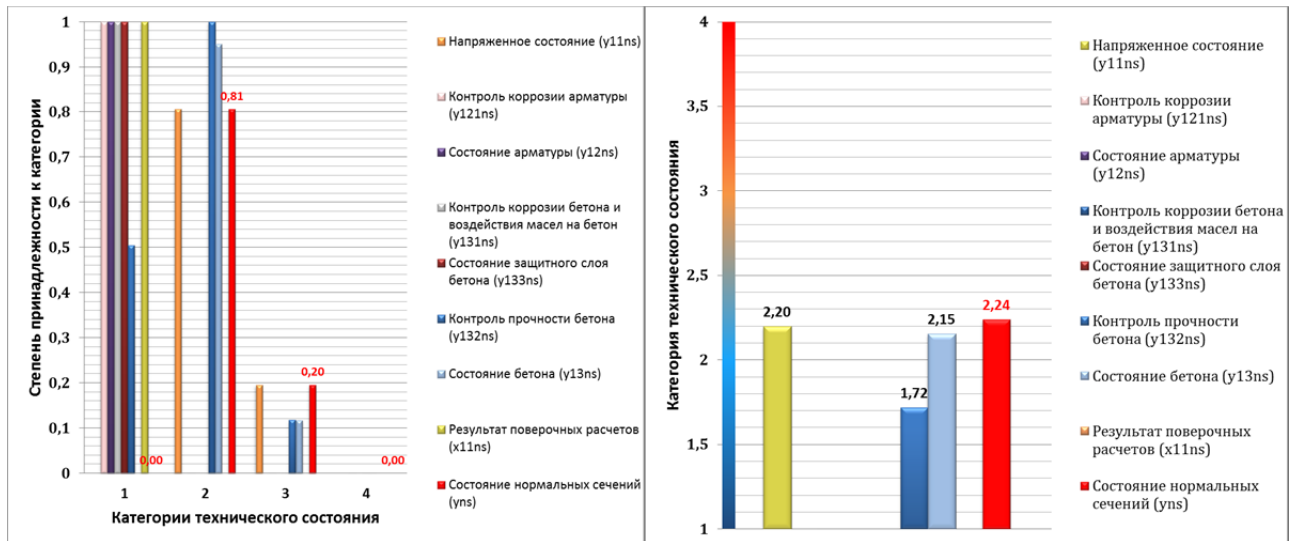
Результаты решений, выдаваемые программой, как на промежуточном этапе, так и итог анализа введенной информации, представляются пользователю в виде оригинальных гистограмм (рисунок 4.9):

- с группировкой признаков по категориям со значениями степеней принадлежности к категориям;
- в виде гистограмм параметров технических состояний и их групп, представленных на непрерывной шкале категорий технических состояний (от 1 (нормативное техническое состояние) до 4 (аварийное техническое состояние)) с указанием четкого (дробного) значения категории.

Для контролируемых параметров, значения которых пользователю неизвестны, экспертная система может самостоятельно подставлять значения, соответствующие границам переходов из одного технического состояния в другое, указывая (подсказывая), таким образом, на важность и влияние отсутствующей информации на техническое состояние конструкции.

Оценка адекватности и достоверности решений, выдаваемых экспертной системой производилась на основе данных технических отчетов по результатам обследований реальных зданий и сооружений с применением железобетонных изгибаемых конструкций, а также при рассмотрении смоделированных сценариев различных повреждений и их сочетаний железобетонных изгибаемых элементов. Было установлено сходство результатов решений с экспертными заключениями специалиста, не принимавшего участия в создании программы, имеющего почти 30-ти летний стаж работы по обследованию конструкций зданий и сооружений. При обработке значений контролируемых параметров, принятых из примеров работ [12, 157, 158], итоговые решения об отнесении конструкций к категориям технического состояния программы «КТС-ИЖБК» не только совпадали с решениями, полученными вероятностными методами, но и конкретизировали выводы четким значением категории.

а)



б)

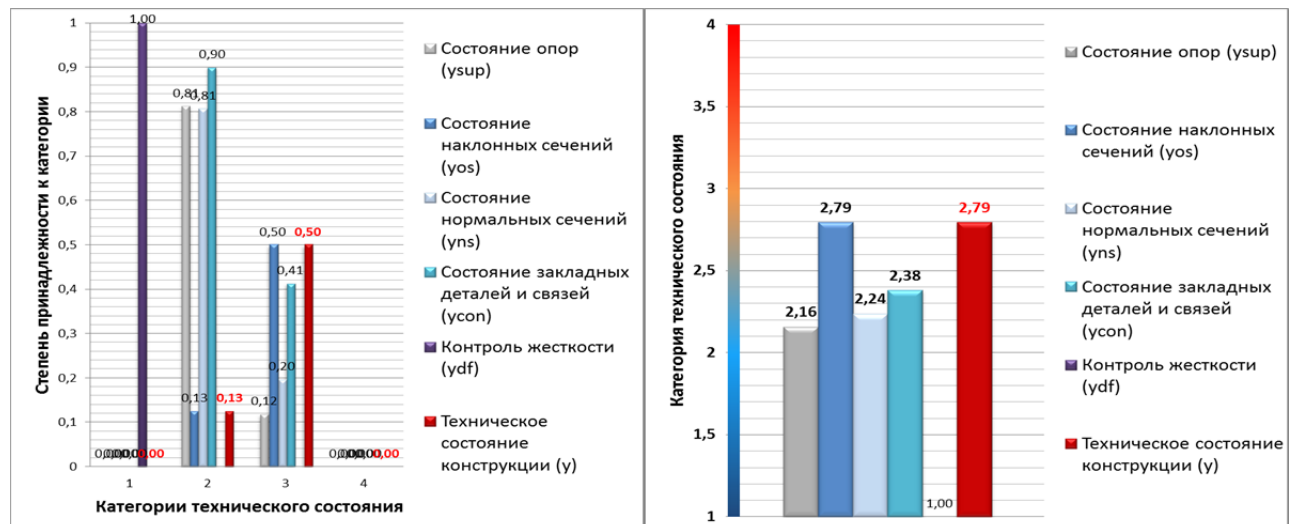


Рисунок 4.9 – Пример графического отображения промежуточных («Состояние нормальных сечений» (а)) и итоговых (б) результатов идентификации технического состояния конструкций в экспертной системе «КТС-ИЖБК»:

в правых окнах результаты определения принадлежностей контролируемых параметров и их групп к категориям технического состояния, левые окна содержат четкие значения технического состояния конструкций на непрерывной шкале категорий

### 4.3 Результаты апробации экспертной системы

Апробация разработанной экспертной системы проходила в процессе обследований существующих строительных конструкции промышленных предприятий Пермского края. Одним из объектов являлись стропильные балки (см. рисунок 4.10) здания ОАО «ПМЦЗ» (г. Пашия). Акт о внедрении представлен в приложении Е.

Результаты апробации экспертной системы «КТС-ИЖБК» показаны на примере оценки технического состояния трех стропильных балок – Б6, Б7 и Б12 (марки балок приняты условно при обследовании конструкций).

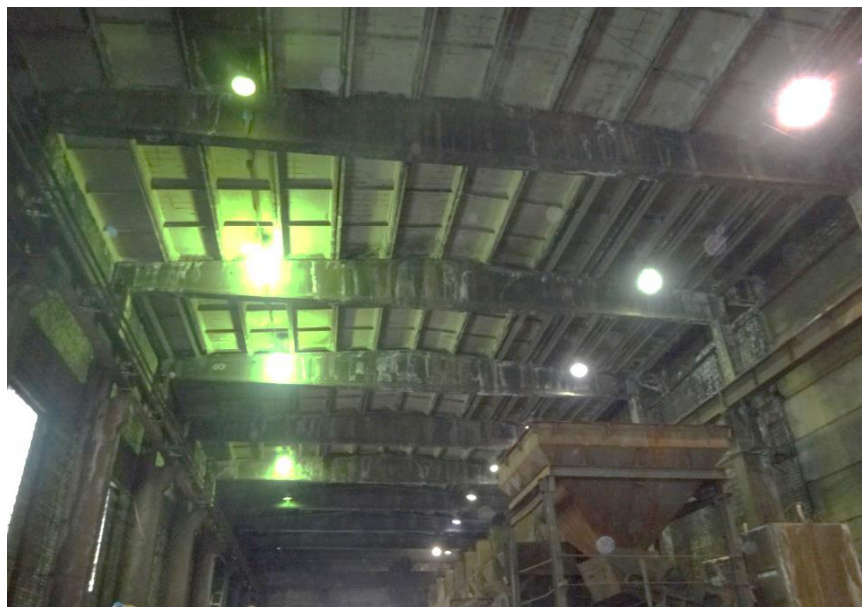


Рисунок 4.10 – Общий вид двускатных стропильных балок в покрытии здания, оцениваемых с помощью экспертной системы «КТС-ИЖБК»

**Причина обследования балок** – появление многочисленных дефектов и повреждений в несущих железобетонных конструкциях покрытия здания за время длительной эксплуатации здания.

**Цель обследования** – оценка технического состояния стропильных балок здания и их пригодности к дальнейшей эксплуатации, разработка рекомендаций по обеспечению нормальной дальнейшей эксплуатации здания.



**Основные характеристики конструкций.** Двускатные стропильные балки двутаврового сечения по геометрическим параметрам и армированию соответствуют серии 1.462.1-16/88 вып.1.

При обследовании каждая стропильная балка была осмотрена с целью выявления возможных дефектов и повреждений (рисунок 4.11). Было выполнено вскрытие отдельных элементов конструкции, произведены комплексные испытания и лабораторные исследования материалов, проведены поверочные расчеты.



Рисунок 4.11 – Участок двускатной стропильной балки Б7 с характерными дефектами и повреждениями

В результате детального обследования балки Б6 для идентификации категории была предоставлена следующая информация:

**1 На опорных участках (опоры):**

- 1.1 участки сплошной поверхностной коррозии арматуры;
- 1.2 сечение арматуры уменьшено в результате коррозии на 1 %;
- 1.3 выщелачивание из извести из бетона – до 3 %;
- 1.4 в продуктах фильтрации обнаружен бикарбонат;
- 1.5 при простукивании бетона издается довольно звонкий звук, остаются малозаметные сколы и штрихи на поверхности бетона;



## **2 На опорных участках (наклонные сечения):**

- 2.1 прочность по результатам поверочного расчета не обеспечена, перенапряжение – 4 %;
- 2.2 участки сплошной поверхностной коррозии поперечной арматуры;
- 2.3 при простукивании бетона издается довольно звонкий звук, на поверхности бетона остаются малозаметные сколы и штрихи
- 2.4 нейтрализация защитного слоя бетона – не более 50 % (толщины защитного слоя бетона).
- 2.5 Площадь повреждения защитного слоя бетона – 45 %

## **3 В пролете (нормальные сечения):**

- 3.1 ширина раскрытия трещин – 0,075 мм;
- 3.2 расстояние между трещинами – 145 мм;
- 3.3 арматура класса А-IIIв;
- 3.4 допустимая ширина раскрытия трещин – 0,3 мм;
- 3.5 сколы бетона (механические повреждения) с уменьшением площади сечения балки – до 1 %
- 3.6 при простукивании бетона издается довольно звонкий звук, на поверхности бетона остаются малозаметные сколы и штрихи.

## **4 Закладные детали:**

- 4.1 участки сплошной поверхностной коррозии деталей;
- 4.2 площадь сечения детали в результате коррозии уменьшена на 1 %.

В результате детального обследования балки Б7 для идентификации категории была предоставлена следующая информация:

## **1 На опорных участках (опоры):**

- 1.1 участки сплошной поверхностной коррозии арматуры;
- 1.2 площадь сечения арматуры уменьшена в результате коррозии на 3 %
- 1.3 выщелачивание извести из бетона – 1 %
- 1.4 продуктах фильтрации обнаружен бикарбонат;
- 1.5 при простукивании бетона издается довольно звонкий звук, остаются

*малозаметные сколы и штрихи на поверхности бетона;*

## **2 На приопорных участках (наклонные сечения):**

*2.1 прочность не обеспечена.*

*2.1 прочность по результатам поверочного расчета не обеспечена, перенапряжение – 4 %;*

*2.2 наклонная трещина ширина раскрытия – 0,1 мм;*

*2.3 длина стержня поперечной арматуры – 910 мм;*

*2.4 арматура класса А-III;*

*2.5 угол наклона наклонной трещины – 48 °;*

*2.6 участки сплошной поверхностной коррозии поперечной арматуры;*

*2.7 выщелачивание извести из бетона – 1 %;*

*2.8 при простукивании бетона издается довольно звонкий звук, на поверхности бетона остаются малозаметные сколы и штрихи;*

*2.9 нейтрализация защитного слоя бетона – не более 35 %*

*2.10 площадь повреждения защитного слоя бетона – 14 %*

## **3 В пролете (нормальные сечения):**

*3.1 сколы бетона (механические повреждения) с уменьшением площади сечения балки – до 3 %;*

*3.2 при простукивании бетона издается довольно звонкий звук, на поверхности бетона остаются малозаметные сколы и штрихи;*

## **4 Закладные детали:**

*4.1 Обнаружены участки сплошной поверхностной коррозии детали;*

*4.2 Площадь сечения детали уменьшена на 2 %.*

В результате детального обследования балки Б12 для идентификации категории технического состояния была предоставлена следующая информация:

## **1. На опорных участках (опоры):**

*1.1 незначительное отклонение (в пределах допуска) от симметричности при установке на колонны в направлении пролета;*

*1.2 локальные участки повреждения арматуры поверхностной коррозией;*

*1.3 площадь сечения арматуры уменьшена в результате коррозии на 1 %;*

*1.4 выщелачивание извести из бетона – 5 %;*

*1.5 в продуктах фильтрации обнаружен бикарбонат;*

*1.6 следы воздействия масел, количество попаданий масла – не более 1 раз/год, продолжительность воздействия – не более 1,5 лет;*

*1.7 при простукивании бетона издается довольно звонкий звук, остаются малозаметные сколы и штрихи на поверхности бетона.*

### **2 На опорах (наклонные сечения):**

*2.1 выщелачивание извести из бетона – 3 %;*

*2.2 следы воздействия масел, количество попаданий масла – не более 1 раз/год, продолжительность воздействия – не более 1,5 лет;*

*2.3 при простукивании бетона издается довольно звонкий звук, на поверхности бетона остаются малозаметные сколы и штрихи*

*2.5 снижение прочности бетона – 2 %;*

*2.6 нейтрализация защитного слоя бетона – не более 27 %;*

*2.7 площадь повреждения защитного слоя бетона – 1 %;*

### **3 В пролете (нормальные сечения):**

*3.1 сколы бетона (механические повреждения) с уменьшением площади сечения балки – до 3 %;*

*3.2 при простукивании бетона издается довольно звонкий звук, на поверхности бетона остаются малозаметные сколы и штрихи*

*3.3 снижение прочности бетона – 3 %;*

*3.4 нейтрализация защитного слоя бетона – 3 %;*

### **4 Закладные детали:**

*4.1 участки сплошной поверхностной коррозии деталей;*

*4.2 площадь сечения детали в результате коррозии уменьшена на 1 %.*

Параметры, приведенные в описании признаков дефектов и повреждений, а также их численные значения, введенные в экспертную систему «КТС-ИЖБК»,

необходимые для идентификации технического состояния конструкций, в качестве примера, для балки Б6 показаны в таблице 4.1, значения всех контролируемых параметров для балки Б7 – в приложении Ж. Условные принадлежности контролируемых параметров с указанием аномалий к участкам балок представлены в приложении З.

Результаты идентификации категории, выданные экспертной системой:

Техническое состояния балки Б6 – **ограниченно-работоспособное, четкое значение категории – 2,79** (рисунок 4.12);

Техническое состояния балки Б7 – **ограниченно-работоспособное, четкое значение категории – 3** (рисунок 4.13);

Техническое состояния балки Б12 – **работоспособное, четкое значение категории – 2,42** (рисунок 4.14).

Результаты оценки технического состояния обследованной конструкции, полученные с помощью экспертной системы подтверждены экспертными заключениями специалистов, не принимавших участия в создании программы, имеющих большой опыт работы по обследованию конструкций зданий и сооружений.

Аналитические результаты позволили установить конструкции с худшим техническим состоянием, выявить их критические дефекты и повреждения, проследить их влияние на итоговое значение категории технического состояния и положительно оценены специалистами, деятельность которых связана с контролем технического состояния эксплуатируемых зданий и сооружений.

Увеличение числа контролируемых параметров и количества термов лингвистических переменных приводит к увеличению набора правил, при этом отмечается улучшение точности реагирования на категорию технического состояния [143].

Таблица 4.1 – Пример численных значений контролируемых параметров, введенных в подсистему «Состояние наклонных сечений» экспертной системы «КТС-ИЖБК» для идентификации технического состояния балки Б6

| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$ | Название<br>контролируемого<br>параметра                             | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы)        | Значение<br>$x_i$ на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменной<br>$x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_b(x_i); \mu_{bc}(x_i); \mu_{ck}(x_i); \mu_n(x_i)\}$ |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11os                                               | Результат<br>поверочных<br>расчетов                                  | Прочность не<br>обеспечена.<br>Перенапряжение<br>по расчету – 4 %                        | <b>4</b> /<br>[0; 30]                                                                     | [0; 0,6; 0,4; 0]                                                                                                        |
| 1211os                                             | Результат<br>освидетельствов<br>ания коррозии<br>арматуры            | Обнаружены<br>участки сплошной<br>поверхностной<br>коррозии<br>поперечной<br>арматуры    | <b>3</b> /<br>{1; 2; 3; 4; 5}                                                             | {0,148; 0,781; 1; 0,8;<br>0,166}                                                                                        |
| 1311os                                             | Результат<br>измерения<br>выщелачивания<br>известки из<br>бетона     | Обнаружены<br>признаки<br>выщелачивания.<br>Выщелачивание<br>известки из бетона<br>– 1 % | <b>1</b> /<br>[0; 24]                                                                     | {0,148; 0,781; 1; 0,8;<br>0,166}                                                                                        |
| 1331os                                             | Результат<br>измерения<br>глубины<br>нейтрализации<br>защитного слоя | Нейтрализация<br>защитного слоя<br>бетона – не более<br>50 %                             | <b>50</b> /<br>[0; 125]                                                                   | {0; 0,5; 0,5; 0}                                                                                                        |
| 1332os                                             | Результат<br>измерения<br>повреждения<br>защитного слоя              | Площадь<br>повреждения<br>защитного слоя<br>бетона – 45 %                                | <b>45</b> /<br>[0; 125]                                                                   | {0; 0; 0,125; 0,875}                                                                                                    |

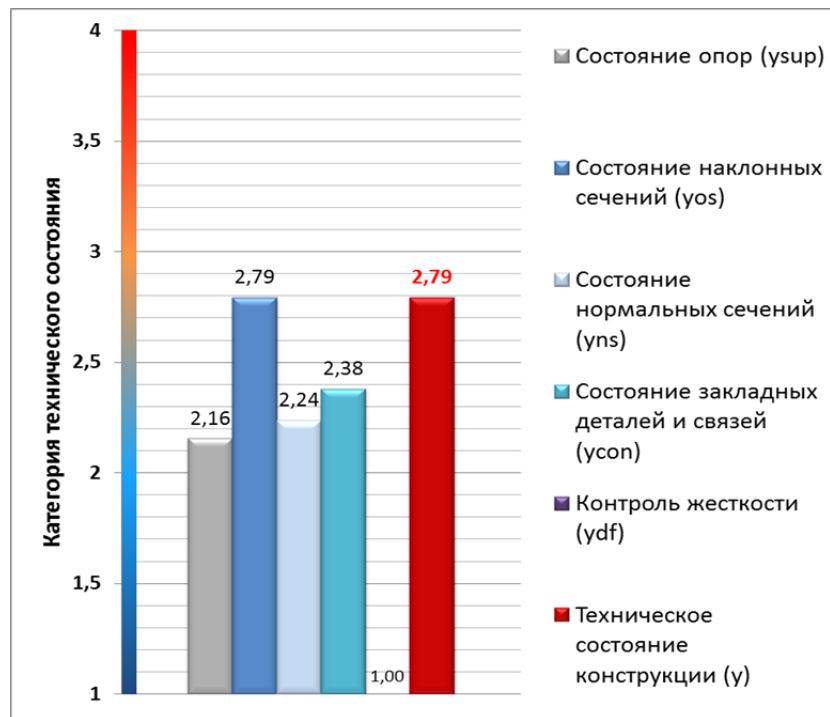


Рисунок 4.12 – Графическое отображение итоговых четких значений результатов идентификации технического состояния балки Б6 в программе «КТС-ИЖБК»

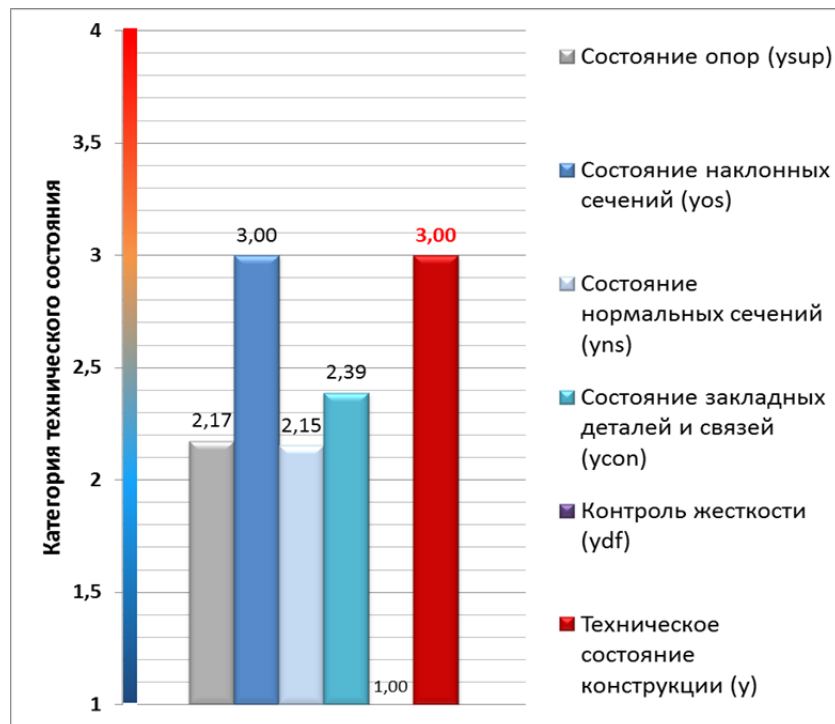


Рисунок 4.13 – Графическое отображение итоговых четких значений результатов идентификации технического состояния балки Б7 в программе «КТС-ИЖБК»

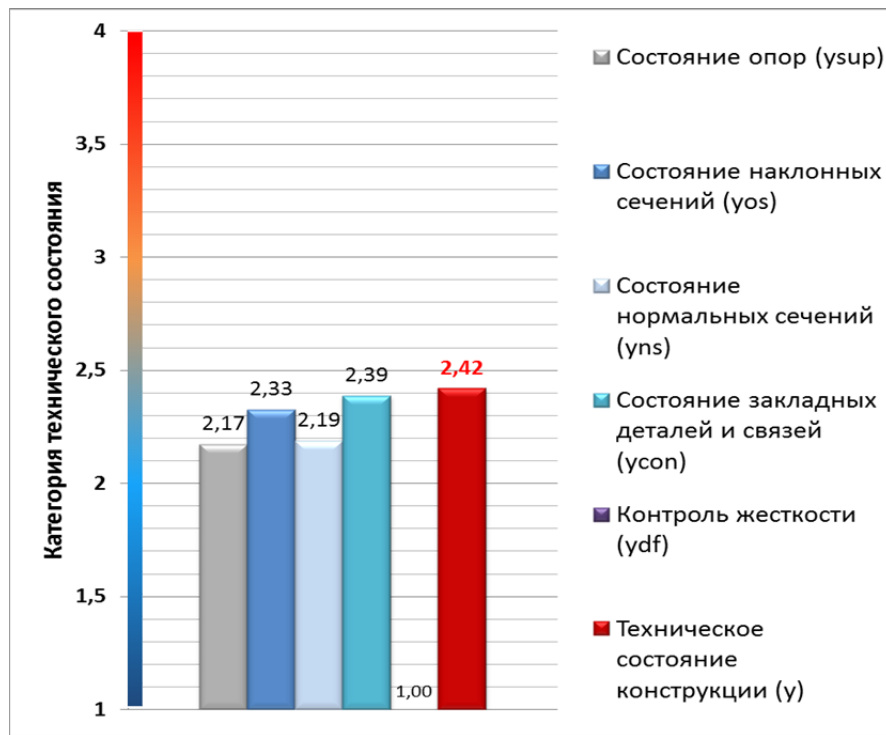


Рисунок 4.14 – Графическое отображение итоговых четких значений результатов идентификации технического состояния балки Б12 в программе «КТС-ИЖБК»

#### 4.3 Выводы по главе 4

- На основании проведенных исследований, изложенных в 4-й главе, сделаны следующие выводы:
- Реализованы, разработанные в исследовании математические модели идентификации технического состояния строительных конструкций в виде интеллектуальной экспертной системы для проведения вычислительных экспериментов.
- Продемонстрировано совпадение выводов экспертной системы с выводами профессиональных экспертов при оценке технического состояния обследуемых конструкций.
- По совокупности приведенных результатов можно утверждать о высокой эффективности предложенных математических моделей, реализованных в табличном процессоре *Microsoft Excel*.

- Визуализация результатов существенно повышает «прозрачность» принимаемых решений о степени аварийности, формирует понимание причин и рисков возможного изменения технического состояния конструкций, зданий или сооружений.

- Предлагаемый интеллектуальный метод оценки технического состояния позволяет существенно сократить время на идентификацию категории технического состояния конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений.

- Показана возможность оперативно оценивать влияние дефектов и повреждений строительной конструкции на ее техническое состояние с помощью компьютерной программы, основанной на моделях искусственного интеллекта.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена разработка математических моделей для оперативного определения категорий технического состояния строительных конструкций массового строительства с использованием экспертных знаний и данных на основе четкой и нечеткой информации:

- Разработана структура декларативной составляющей базы знаний оценки технического состояния строительных конструкций на примере железобетонных изгибаемых элементов с помощью онтологического системного анализа, позволяющая комплексно увязать и соподчинить информацию, необходимую для контроля степени эксплуатационной пригодности конструкции. Проведена структуризация знаний, упрощающая их добавление и изменение при создании баз знаний экспертных систем для оценки технического состояния строительных конструкций.

- Разработаны математические модели для формализации экспертных данных о признаках технического состояния конструкций (для построения функций принадлежности значений контролируемых параметров к лингвистическим оценкам).

- Предложена, адаптирована и применена математическая модель нечеткого логического вывода Мамдани в вычислении конкретного (четкого) значения категории технического состояния конструкции, обеспечивающая чувствительность реагирования результата оценки на изменение входных значений контролируемых параметров.

- Разработаны алгоритмы и управляющие правила для оперативной оценки технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций массового строительства.

- На основе разработанных математических моделей создана и внедрена в практику работы экспертных групп интеллектуальная нечеткая экспертная система для определения категории технического состояния железобетонных

изгибаемых конструкций «КТС-ИЖБК», запатентованная в Роспатенте (Свидетельство № 2018615097 от 24.04.2018 г.).

- Применение интеллектуальной экспертной системы для оценки технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций показало положительный эффект в принятии решений: сокращение времени на аналитическую обработку информации; снижение неопределенностей в решениях задач большой размерности; возможность выявлять и контролировать автоматизированным способом причинно-следственную связь между признаками и состоянием конструкций.

**Перспективами дальнейшей разработки темы** могут являться исследования по разработке математических моделей экспертных систем, составляющих комплексную интеллектуальную систему обследования конструкций (разработка моделей для распознавания изображений дефектов и повреждений, для прогнозирования сроков службы конструкций и определения рисков наступления аварийного состояния, для формирования рекомендаций и указаний по приведению конструкции к дальнейшей нормальной эксплуатации).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1991-01-01. – М. : Стандартинформ, 2009. – 9 с.
2. Римшин, В. И. Обследование и испытание зданий и сооружений: учеб. для вузов [Текст] / В. Г. Казачек [и др.]; под ред. В. И. Римшина. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2006. – 652 с.
3. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения [Текст]. – Введ. 2017-03-01. – М. : Стандартинформ, 2016. – IV, 23 с.
4. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений [Текст] : федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ : [принят Гос. Думой 23 декабря 2009 года] // Российская газета. – 2009. – Федеральный выпуск № 5079 (255).
5. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния [Текст]. – Введ. 2014-01-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – IV, 54 с.
6. Пономарев, В. Н. О необходимости системного подхода к научным исследованиям в области комплексной безопасности и предотвращения аварий зданий и сооружений [Текст] / В. Н. Пономарев, В. И. Травуш, В. М. Бондаренко, К. И. Еремин // Архитектура. Строительство. Образование. – 2014. – № 2 (4). – С. 7-16.
7. Тонков, И. Л. Актуальные проблемы оценки технического состояния строительных конструкций [Текст] / И. Л. Тонков, Ю. Л. Тонков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 3. – С. 94-104.
8. Букин, А. В. Определение прочности бетона методами разрушающего и неразрушающего контроля [Текст] / А. В. Букин, А. Н. Патраков // Вестник Пермского гос. техн. университета. Строительство и архитектура. – 2010. – № 1. – С. 89-94.

9. Улыбин, А. В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений [Текст] / А. В. Улыбин // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 4. – С. 10-15.

10. Ерёмин, К. И. Особенности экспертизы и НК металлических конструкций эксплуатируемых сооружений [Текст] / К. И. Ерёмин, С. А. Матвеюшкин // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – № 4 (42). – С. 4-7.

11. Казачек, В. Г. Совершенствование нормируемых методов обеспечения надежности железобетонных конструкций при проектировании и обследовании зданий и сооружений [Текст] / В. Г. Казачек // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. науч. тр. – М., 2010. – Вып. 9. – С. 65-77.

12. Соколов, В. А. Вероятностный анализ технического состояния (ВАТС) строительных конструкций зданий старой городской застройки [Текст] / В.А. Соколов: Монография. – Saarbrücken, Germany: Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing is a trademark of: AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG. Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121, 2013. – 152 с.

13. Тонков, Ю. Л. Определение принадлежности дефектов и повреждений железобетонных конструкций к категориям технического состояния [Текст] / Ю.Л. Тонков, А.З. Чепулис, К.Л. Синани // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2016. – Т. 2. – С. 110-116.

14. Соколов, В. А. Категории технического состояния строительных конструкций зданий при их диагностике вероятностными методами [Текст] / В. А. Соколов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6, Ч. 6 – С. 1159-1164.

15. Калугин, А. В. Технические аспекты аварии покрытия бассейна [Текст] / А.В. Калугин [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 7, Ч. 2 – С. 12-14.

16. Карпенко, Л. А. История психологии в лицах. Персоналии [Текст] / Л. А. Карпенко // Психологический лексикон. Энциклопедический словарь в шести томах / ред.-сост. Л. А. Карпенко; под общ. ред. А. В. Петровского. – М. : ПЕР СЭ, 2005. – 784 с.

17. Кашеварова, Г. Г. Нечеткая экспертная система диагностики повреждений строительных конструкций [Текст] / Г. Г. Кашеварова, Ю.Л. Тонков, М. Н. Фурсов // Вестник Волжского регионального отделения РААСН: сб. науч. тр. вып. 17. – Н. Новгород: ННГАСУ. – 2014. – № 17. – С. 167-173.

18. Тонков, Ю. Л. Интеллектуальная нечеткая экспертная система определения категории технического состояния железобетонных конструкций [Текст] / Ю. Л. Тонков, Г. Г. Кашеварова // Тезисы докладов VI международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», 15-20 августа 2016 года. – Владивосток : Дальневост. федерал. ун-т. – 2016. – С. 158-159.

19. Кашеварова, Г. Г. Автоматизированный поиск четкого значения категории технического состояния строительных конструкций в задачах экспертного заключения [Текст] / Г. Г. Кашеварова, Ю. Л. Тонков // Строительство и реконструкция. – 2016. – № 6(68). – С. 57-70.

20. Кашеварова, Г. Г. Интеллектуальная автоматизация инженерного обследования строительных объектов [Текст] / Г. Г. Кашеварова, Ю. Л. Тонков, И. Л. Тонков // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Т. 11, № 4 – С. 42-57.

21. Айвазян, С. А. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное издание [Текст] / С. А. Айвазян, Н. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 471 с.

22. Биргер, И. А. Техническая диагностика [Текст] / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

23. Болотин, В. В. Методы теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений [Текст] / В. В. Болотин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1981. – 351 с.

24. Колемаев, В. А. Теория вероятности и математической статистики [Текст] : учебное пособие для вузов / В. А. Колемаев, О. В. Староверов, В. Б. Турундаевский ; под ред. В. А. Колемаева. – М. : Высшая школа, 1991. – 400 с.

25. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] : учебное пособие для студентов вузов / В. Е. Гмурман. – 12-е изд. / перераб. – М. : Юрайт : Высш. образование, 2009. – 478, [1] с.
26. Смолин, Д. В. Введение в искусственный интеллект: конспект лекций [Текст] / Д. В. Смолин. – 2-е изд., перераб. – М. : Физматлит, 2007. – 259 с.
27. Асаи, К. Прикладные нечеткие системы [Текст] / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; пер. с япон.; под ред. Т. Терано, К. Асаи, М. Сугено. – М. : Мир, 1993. – 386 с.
28. Норвич, А. М. Построение функций принадлежности [Текст] / А. М. Норвич, И. Б. Турксен // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения : пер. с англ. / Под ред. Р. Р. Ягера. – М. : Радио и связь, 1986. – С. 64-71.
29. Толковый словарь по искусственному интеллекту [Текст] / авт.-сост. А. Н. Аверкин и др. – М. : Радио и связь, 1992. – 254, [1] с.
30. Рассел, С. Искусственный интеллект [Текст] : современный подход / Стюарт Рассел, Питер Норвиг; [пер. с англ. и ред. К. А. Птицына]. – 2-е изд. – М. [и др.]: Вильямс, 2015. – 1407 с.
31. Zadeh, L. A. Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing [Text] / L. A. Zadeh // Communications of the ACM. – 1994. – Vol. 37, № 3. – P. 77-84.
32. Борисов, А. Н. Принятие решения на основе нечетких моделей: примеры использования [Текст] / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров. – Рига : Зинатне, 1990. – 184 с.
33. Заде, Л. А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений [Текст] / Л. А. Заде // Математика сегодня. – М. : Знание, 1974. – С. 5-49.
34. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и ее применение к понятию приближенных решений [Текст] / Л. Заде. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
35. Заде, Л. А. Размытые множества и их применения в распознавании образов и кластер-анализе [Текст] // В кн. Классификация и кластер; под. ред. Д. В. Райзина. – М. : Мир, 1980. – С. 208-247.

36. Аверкин, А. Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта [Текст] / А. Н. Аверкин, И. З. Батыршин, А. Ф. Блишун, В. Б. Силов, В. Б. Тарасов; под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
37. Ротштейн, А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети [Текст] / А. П. Ротштейн. – Винница: УНИВЕРСУМ – Винница, 1999. – 320 с.
38. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С. Д. Штовба. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
39. Коньшева, Л. К. Основы теории нечетких множеств [Текст] : учеб. пособие / Л. К. Коньшева, Д. М. Назаров. – СПб. : Питер, 2011. – 192 с.
40. Яхьяева, Г. Э. Нечеткие множества и нейронные сети [Текст] : учеб. пособие / Г. Э. Яхьяева. – М. : Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с.
41. Заде, Л. А. Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных интеллектуальных систем [Текст] // Новости искусственного интеллекта. – 2001. – № 2-3. – С. 7-11.
42. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств [Текст] : пер. с франц. / А. Кофман. – М. : Радио и связь, 1982. – 432 с.
43. Мак-Каллок, У. С. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности [Текст] / У. С. Мак-Каллок, В. Питтс // Автоматы / под ред. К. Э. Шеннона, Д. М. Маккарти. – М. : ИЛ, 1956. – С. 363-384.
44. Ясницкий, Л. Н. Введение в искусственный интеллект [Текст] / Л. Н. Ясницкий. – М. : Изд. центр Академия, 2005. – 176 с.
45. Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems / J.H. Holland. – Ann Arbor : University of Michigan Press, 1975. – 228 pp.
46. Goldberg, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning [Text] / D. E. Goldberg. – Addison-Welsey, 1989. – 432 pp.
47. Deneubourg, J. Self-organization mechanisms in ant societies (II): learning in foraging and division of labor [Text] / J. Deneubourg, S. Goss, J.M. Pasteels // From

Individual to Collective. Behavior in Social Insects. – Basel : Birkhauser, 1987. – 267 pp.

48. Shi, Y. A modified particle swarm optimizer [Text] / Y. Shi, R.C. Eberhart // Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. – 1998. – P. 69–73.

49. Dorigo, M. Ant Algorithms for Discrete Optimization [Text] / M. Dorigo, G. Caro, L. Gambardella // Artificial Life. – 1999. – Vol. 5, № 3 – P. 137-172.

50. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] : пер. с польск. И. Д. Рудинского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – 2-е изд. – М. : Горячая линия – Телеком, 2008. – 383 с.

51. Муромцев, Д. И. Введение в технологию экспертных систем [Текст] / Д. И. Муромцев. – СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2005. – 93 с.

52. Джарратано, Дж. Экспертные системы: принципы разработки и программирование [Текст] / Дж. Джарратано, Г. Райли. – М. : Вильямс, 2007. – 1152 с.

53. Построение экспертных систем [Текст] : пер. с англ. / Под ред. Ф. Хейеса-Рота, Д. Уотермана, Д. Лената. – М. : Мир, 1987. – 441 с.

54. Гаврилова, Т. А. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем [Текст] / Т. А. Гаврилова, К. Р. Червинская. – М. : Радио и связь, 1992. – 200 с.

55. Senouci, A. Genetic algorithm-based multi-objective model for scheduling of linear construction projects [Text] / A. Senouci, H. R. Al-Derham // Advances in Engineering Software. – 2008. – Vol. 39, № 12. – P. 1023-1028.

56. Zhao, M. Y. Multiple criteria data envelopment analysis for full ranking units associated to environmental impact assessment [Text] / M. Y. Zhao, C. T. Cheng, K. W. Chau, G. Li // International Journal of Environment and Pollution. – 2006 – Vol. 28, № 3–4. – P. 448-464.

57. Алехин, В. Н. Разработка модели генетического алгоритма для оптимизации стальных многоэтажных рам [Текст] / В. Н. Алехин, А. Б. Ханина //



International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2008. – T. 4, № 2 – C. 16-18.

58. Nieto-Morote, A. A fuzzy approach to construction project risk assessment [Text] / A. Nieto-Morote, F. Ruz-Vila // International Journal of Project Management. – 2011. – Vol. 29, № 2. – P. 220-231.

59. Fazel Zarandi, M. H. Fuzzy polynomial neural networks for approximation of the compressive strength of concrete [Text] / M. H. Fazel Zarandi, I. B. Turksen, J. Sobhani, A. A. Ramezaniapour // Applied Soft Computing Journal. – 2008. – Vol. 8, № 1. – P. 488-498.

60. Gupta, R. Prediction of concrete strength using neural-expert system [Text] / R. Gupta, M. A. Kewalramani, A. Goel // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2006. – Vol. 18, № 3. – P. 462-466.

61. Sariyar, O. Expert system approach for soil structure interaction and land use [Text] / O. Sariyar, D. N. Ural // Journal of Urban Planning and Development. – 2010. – Vol. 136, № 2. – P. 135-138.

62. Zain, F. M. An expert system for mix design of high performance concrete [Text] / F. M. Zain, M. N. Islam, I. H. Basri // Advances in Engineering Software. – 2005. – Vol. 36, № 5, P. 325-337.

63. Cheng, M. Y. Evaluating subcontractor performance using evolutionary fuzzy hybrid neural network [Text] / M. Y. Cheng, H. C. Tsai, E. Sudjono // International Journal of Project Management. – 2011. – Vol. 29, № 3. – P. 349-356.

64. Albert, K. A knowledge-based application in engineering [Text] / K. Albert, W. Wu // Advances in Engineering Software. – 1997. – Vol. 28, № 8. – P. 469-486.

65. Tiryaki, B. Application of artificial neural networks for predicting [Text] // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2007. – Vol. 23, № 3. – P. 273-280.

66. Jiang, A. N. Feedback analysis of tunnel construction using a hybrid arithmetic based on Support Vector Machine and Particle Swarm Optimisation [Text] / A. N. Jiang, S. Y. Wang, S. L. Tang // Automation in Construction. – 2011. – Vol. 20, № 4. – P. 482-489.

67. Zhang, H. Fuzzy-multi-objective particle swarm optimization for time-cost-quality tradeoff in construction [Text] / H. Zhang, F. Xing // Automation in Construction. – 2010. – Vol. 19, № 8. – P. 1067-1075.

68. Солдатенко, Т. Н. Модель деловой репутации подрядчика при строительстве здания [Текст] / Т. Н. Солдатенко // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 12 (27). – С. 7-23.

69. Van Balen, K. Expert system for evaluation of deterioration of ancient brick masonry structures [Text] // Science of the Total Environment. – 1996. – Vol. 189–190. – P. 247–254.

70. Van Balen, K. Learning from damage of masonry structures, expert systems can help [Text] / K. Van Balen // III International Seminar on Historical Constructions. – Portugal, Guimaraes, 2001. – November. – P. 15-27.

71. Zhao, Z. A fuzzy system for concrete bridge damage diagnosis [Text] / Z. Zhao, C. Chen // Computers & Structures. – 2002. – Vol. 80, № 7–8. – P. 629-641.

72. Moodi, F. Research into a management system for diagnosis, maintenance, and repair of concrete structures [Text] / F. Moodi, J. Knapton // Journal of Construction Engineering and Management. – 2003. – Vol. 129, № 5. – P. 555–561.

73. Lee, J. A fuzzy petri net-based expert system and its application to damage assessment of bridges [Text] / J. Lee, KFR Liu, W. Chiang // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B : Cybernetics. 1999. – Vol. 29, № 3. – P. 350–369.

74. Sobhani, J. Service life of the reinforced concrete bridge deck in corrosive environments: A soft computing system [Text] / J. Sobhani, A. A. Ramezaniapour // Applied Soft Computing Journal. – 2011. – Vol. 11, № 4. – P. 3333–3346.

75. Chao, C. J. Fuzzy pattern recognition model for diagnosing cracks in RC structures [Text] / C. J. Chao, F. P. Cheng // Journal of Computing in Civil Engineering. – 1998. – Vol. 12, № 2. – P. 111-119.

76. Najjaran, H. Fuzzy expert system to assess corrosion of cast/ductile iron pipes from backfill properties [Text] / H. Najjaran, R. Sadiq, B. Rajani // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2006. – Vol. 21, № 1. – P. 67-77.

77. Панкевич, О. Д. Застосування нечітких моделей для діагностики будівельних конструкцій. [Текст] / О. Д. Панкевич, С. Д. Штовба // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С. 32-36.

78. Hamdia, K. M. Expert System for Structural Evaluation of Reinforced Concrete Buildings in Gaza Strip Using Fuzzy Logic [Text] : A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Master of Science in Civil Engineering – Rehabilitat / Khader M. Hamdia. – 2010. – VIII, 74 с.

79. Gonzalez-Jorge, H. Monitoring biological crusts in civil engineering structures using intensity data from terrestrial laser scanners [Text] / H. Gonzalez-Jorge, D. Gonzalez-Aguilera, P. Rodriguez-Gonzalvez, P. Arias // Construction and Building Materials. – 2012. – Vol. 31. – P. 119-128.

80. Коняева, Е. И. Методы кластеризации в задачах оценки технического состояния зданий и сооружений в условиях неопределённости [Текст] : дис. канд. техн. наук: 05.13.01 / Коняева Елена Ивановна. – Рязань, 2010. – 291 с.

81. Солдатенко, Т. Н. Модель идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе результатов ее обследования [Текст] / Т. Н. Солдатенко // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 7 (25). – С. 52–61.

82. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений [Текст]. – Введ. 2003-08-21. – М. : ФГУП ЦПП, 2004. – IV, 26 с.

83. Кондаков, И. М. Психология [Текст] : Иллюстрированный словарь / И. М. Кондаков. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – СПб. : Прайм-ЕВРОЗНАК, 2007. – 783 с.

84. Kashevarova, G. G. Development of expert system module for technical state categories of construction structures [Text] / G.G. Kashevarova , Y.L. Tonkov // Инновационные процессы в исследовательской и инновационной деятельности. – 2014. – № 1. – С. 165-168.

85. Кашеварова, Г. Г. Разработка модуля экспертной системы диагностики зданий и сооружений для определения категорий технических состояний строительных конструкций [Текст] / Г. Г. Кашеварова, Ю. Л. Тонков // Вестник

отделения строительных наук: сб. науч. тр. вып. 18 РААСН. – Москва: МГСУ. – 2014. – С. 30-35.

86. Кашеварова, Г. Г. Интеллектуальные технологии в обследовании строительных конструкций [Текст] / Г. Г. Кашеварова, Ю. Л. Тонков // Academia. Архитектура и строительство. – 2018. – №1. – С. 92-99.

87. Chen, Y. Automatic Design of Hierarchical Takagi–Sugeno Type Fuzzy Systems Using Evolutionary Algorithms [Text] / Y. Chen, B. Yang, A. Abraham, L. Peng // IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2007. – Vol. 15, № 3. – P. 385-397.

88. Синюк, В. Г. Алгоритм построения иерархических систем нечеткого вывода Такаги-Сугено [Текст] / В. Г. Синюк, В. М. Поляков, А. А. Кузубова // Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ : в 3 т. – Белгород : БГТУ им В. Г. Шухова, 2012. – Т. 2. – С. 247-253.

89. Gruber, T. R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications [Text] / T. R. Gruber // Knowledge Acquisition. – 1993. – № 5(2). – P. 199-220.

90. Guarino, N. The Ontological Level [Text] / N. Guarino, R. Casati, N. Smith, G. White // Philosophy and the Cognitive Sciences. – Vienna : Holder-Pichler-Tempsky, 1994. – P. 443-456.

91. Тузовский, А. Ф. Формирование семантических метаданных для объектов системы управления знаниями [Текст] / А. Ф. Тузовский // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310, № 3. – С. 108–112.

92. Когаловский, М. Р. Перспективные технологии информационных систем [Текст] / М. Р. Когаловский. – М. : ДМК Пресс ; М. : Компания АйТи, 2003. – 288 с.

93. Муромцев, Д. И. Онтологический инжиниринг знаний в системе Protégé [Текст] : Методическое пособие / Д. И. Муромцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 62 с.

94. Guarino, N. Formal Ontology in Information Systems [Text] / N. Guarino // Proceedings of FOIS'98. – Amsterdam : IOS Press, 1998. – P. 3-15.

95. Guarino, N. What Is an Ontology? [Text] / N. Guarino, D. Oberle, S. Staab // Handbook on Ontologies. – 2009. – P. 1-17.
96. Смирнов, С. В. Онтологический анализ предметных областей моделирования [Текст] / С. В. Смирнов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2001. – Т. 3, № 1. – С. 62-70.
97. Смирнов, С. В. Среда моделирования для построения инженерных теорий [Текст] / С. В. Смирнов // Известия Самарского научного центра РАН. – 1999. – Т. 1, № 2. – С. 277-285.
98. Смирнов, С. В. Онтологическая относительность и технология компьютерного моделирования сложных систем [Текст] / С. В. Смирнов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2000. – Т. 2, № 1. – С. 66-72.
99. Загорулько, Ю. А. Семантический подход к анализу документов на основе онтологии предметной области [Текст] / Ю. А. Загорулько, И. С. Кононенко, Е. А. Сидорова // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: труды междунар. конф. «Диалог 2006» – М.: Изд. РГГУ, 2006. – С. 468-473.
100. Гаврилова, Т. А. Онтологический подход к управлению знаниями при разработке корпоративных информационных систем [Текст] / Т. А. Гаврилова // Новости искусственного интеллекта. – 2003. – № 2. – С. 24-30.
101. Гаврилова, Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем [Текст] : Учеб. пособие / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. - СПб. [и др.] : Питер, 2000. – 382 с.
102. Палагин, А. В. Методика проектирования онтологии предметной области [Текст] / А. В. Палагин, Н. Г. Петренко, К. С. Малахов // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2011. – № 10. – С. 5-12.
103. Палагин, А. В. Системная интеграция средств компьютерной техники [Текст] / А. В. Палагин, Ю. С. Яковлев. – Винница : Универсум-Винница, 2005. – 680 с.

104. Палагин, А. В. Системно-онтологический анализ предметной области [Текст] / А. В. Палагин, Н. Г. Петренко // Управляющие системы и машины. – 2009. – № 4. – С. 3-14.

105. Палагин, А. В. Онтологические методы и средства обработки предметных знаний [Текст] / А. В. Палагин, С. Л. Крытый, Н. Г. Петренко. – [монография]. – Луганск : изд-во ВНУ им. В. Даля, 2012. – 323 с .

106. Палагин, А. В. Об онтологическом подходе в образовании [Текст] / А. В. Палагин, Ю. Л. Тихонов, Н. Г. Петренко, В. Ю. Величко // Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2011. – № 13 (167). – С. 171–178.

107. Хасаев, Г. Р. Региональная экономика как объект онтологического анализа [Текст] / Г. Р. Хасаев, В. А. Виттих, Л. А. Иванова, Е. Н. Королева, Е. Л. Поварова, С. В. Смирнов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2003. – Т. 5, № 1. – С. 74-82.

108. Лоскутов, А. Ю. Основы теории сложных систем [Текст] / А. Ю. Лоскутов, А. С. Михайлов. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и стохастическая динамика», 2007. – 612 с.

109. Ройтман, А. Г. Предупреждение аварий жилых зданий [Текст] / А. Г. Ройтман. – М. : Стройиздат, 1990. – 240 с.

110. Гроздов, В. Т. Признаки аварийного состояния несущих конструкций зданий и сооружений [Текст] / В. Т. Гроздов. – СПб. : Издательский дом KN+, 2000. – 48 с.

111. Гроздов, В. Т. Дефекты строительных конструкций и их последствия [Текст] / В. Т. Гроздов. – СПб. : Общероссийский общественный фонд «Центр качества строительства», 2007. – 136 с.

112. Гучкин, И. С. Диагностика повреждений и восстановление эксплуатационных качеств конструкций [Текст] : учеб. пособие / И. С. Гучкин. - М. : Издательство АСВ, 2000. - 171, [1] с.

113. Леденев, В. В. Предупреждение аварий [Текст] : учеб. пособие для студентов вузов / В. В. Леденев, В. И. Скрылев. – М. : АСВ, 2002. – 239 с.

114. Дементьева, М. Е. Техническая эксплуатация зданий: оценка и обеспечение эксплуатационных свойств конструкций зданий [Текст] : учебное пособие / М. Е. Дементьева. – М. : МГСУ, 2008. – 227 с.

115. Добромыслов, А. Н. Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений [Текст] : справочное пособие / А. Н. Добромыслов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : МГСУ : Изд-во Ассоц. строительных вузов, 2008. – 304 с.

116. Добромыслов, А. Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам [Текст] : справочное пособие / А. Н. Добромыслов. – М. : Издательство АСВ, 2008. – 72 с.

117. Мальганов, А. И. Восстановление и усиление ограждающих строительных конструкций зданий и сооружений [Текст] : учебное пособие / А. И. Мальганов, В. С. Плевков. – Томск : Печатная мануфактура, 2002. – 390 с.

118. Прядко, Н. В. Обследование и реконструкция жилых зданий [Текст] : учебное пособие / Н. В. Прядко. – Макеевка : ДонНАСА, 2006. – 156 с.

119. Пузанов, А. В. Методы обследования коррозионного состояния арматуры железобетонных конструкций [Текст] / А. В. Пузанов, А. В. Улыбин // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 7. – С. 18-25.

120. Методические рекомендации по оценке свойств бетона после пожара [Текст] / В. В. Жуков [и др.] ; НИИ бетона и железобетона, Ин-т строит. техники. – М. : НИИЖБ, 1985. – 20 с.

121. Ильин, Н. А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции [Текст] / Н. А. Ильин. – М. : Стройиздат, 1979. – 128 с.

122. Васильев, Н. М. Влияние нефтепродуктов на прочность бетона [Текст] / Н. М. Васильев // Бетон и железобетон. – 1981, № 3. – С. 36-37.

123. Бедов, А. И. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений [Текст] : учебное пособие. В 2 ч. Ч.1. Оценка технического состояния оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений / А. И. Бедов, В. В. Знаменский, А. И. Габитов. – М. : Изд-во АСВ, 2014. – 704 с.

124. Савицкий, Н. В. Основы расчета надежности железобетонных конструкций в агрессивных средах [Текст] : дис. докт. техн. наук : 05.23.01 / Савицкий Николай Васильевич. – М., 1994. – 399 с.

125. Евстифеев, В. Г. Железобетонные и каменные конструкции [Текст] : учебник. В 2 ч. Ч. 1. Железобетонные конструкции / В. Г. Евстифеев. – М. : Издательский центр «Академия», 2011. – 432 с.

126. Бойко, М. Д. Диагностика повреждений и методы восстановления эксплуатационных качеств зданий [Текст] / М. Д. Бойко – Л. : Стройиздат, 1975. – 336 с.

127. Балалаев, Г. А. Защита строительных конструкций от коррозии [Текст] : учеб. пособие для инж.-строит. вузов и фак. / Г. А. Балалаев, В. М. Медведев, Н. А. Мощанский. – М. : Стройиздат, 1966. – 224 с.

128. Классификатор основных видов дефектов в строительстве и промышленности строительных материалов [Текст]. – Введ. 1993-11-01. – М. : Главгосархстройнадзор России – 95 с.

129. Пособие по практическому выявлению пригодности к восстановлению поврежденных строительных конструкций зданий и сооружений и способам их оперативного усиления [Текст]. – М. : ЦНИИпромзданий, 1996. – 98 с.

130. Рекомендации по обследованию и мониторингу технического состояния эксплуатируемых зданий, расположенных вблизи нового строительства или реконструкции [Текст]. – Введ. 1998-11-18. – М. : ГУП «НИАЦ», 1998. – 89 с.

131. Руководство по обеспечению долговечности железобетонных конструкций предприятий черной металлургии при их реконструкции и восстановлении / Харьковский ПромстройНИИпроект, НИИЖБ. – М. : Стройиздат, 1982. – 112 с.

132. Рекомендации по натурным обследованиям железобетонных конструкций [Текст] / Госстрой СССР ; НИИ бетона и железобетона. – М. : Производственно-экспериментальные мастерские ЦНИИС Госстроя СССР, 1972. – 77 с.



133. СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций [Текст]. – Введ. 2006-11-01. – М. : ФГУП «НИЦ «Строительство» : ФГУП ЦПП, 2006. – 73 с.

134. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий [Электронный ресурс] / АО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ». – М. : База нормативной документации: [www.complexdoc.ru](http://www.complexdoc.ru), 2004 – 275 с.

135. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения [Текст]. – Введ. 2015-07-01. – М. : Стандартиформ, 2015. – II, 13 с.

136. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 [Текст]. Введ. 2013-01-01. – М. : Минрегион России, 2012 – II, 147 с.

137. Рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений [Текст] / НИИ строит. конструкций. – М. : Стройиздат, 1989. – 104, [2] с.

138. СНиП II-B1.62. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования [Текст]. – Введ. 1963-01-01. – М. : Госстрой СССР : Стройиздат, 1970. – 113 с.

139. Ерёмин, К. И. Хроника аварий зданий и сооружений, произошедших в 2009 г. [Текст] / К. И. Ерёмин // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. науч. тр. – М., 2010. – Вып. 9. – С. 5-15.

140. Орлов, А. И. Проблемы устойчивости и обоснованности решений и теории экспертных оценок [Текст] / А. И Орлов // Статистические методы анализа экспертных оценок / отв. редактор Т. В. Рябушкин – М. : Наука, 1977. – С. 7-30.

141. Кашеварова, Г. Г. О построении функций принадлежности нечеткого множества в контексте задачи диагностики повреждений железобетонных плит [Текст] / Г. Г. Кашеварова, Ю. Л. Тонков, М. Н. Фурсов // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2014. – Т. 10, № 2. – С. 93-101.

142. Kashevarova, G. G. Membership functions of fuzzy sets in the diagnosis of structures pathology [Text] / G. G. Kashevarova, M. N. Fursov, Y. L. Tonkov //

Informatics, Networking and Intelligent Computing (INIC 2014), 16-17 Nov. 2014, Shenzhen, China / Taylor & Francis Group, A Balkema Book, 2015. – P. 261-264.

143. Кашеварова, Г. Г. Определение технического состояния наклонных сечений железобетонных конструкций в экспертной системе с нечетким логическим выводом [Текст] / Г. Г. Кашеварова, Ю. Л. Тонков // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2015. – Т. 11, № 4 – С. 77-85.

144. Кашеварова, Г. Г. Онтологический анализ нечеткой базы знаний в системе поддержки принятия решений о техническом состоянии изгибаемых железобетонных конструкций [Текст] / Г. Г. Кашеварова, Ю. Л. Тонков // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2015. – Т. 11, № 4. – С. 86-97.

145. Тонков, Ю. Л. Выбор эффективного метода построения функций принадлежности для оценки качественных признаков технического состояния строительных конструкций [Текст] / Ю. Л. Тонков // Прикладная экология. Урбанистика. – 2016. – № 3(23). – С. 126-146.

146. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати; [пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе]. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.

147. Литвак, Б. Г. Экспертная информация. Методы получения и анализа [Текст] / Б. Г. Литвак. – М. : Радио и связь, 1982. – 184 с.

148. Laarhoven, P.J.M. A fuzzy extension of Saaty's priority theory [Text] / P.J.M Laarhoven, W. A. Pedrycz // Fuzzy sets and Systems. – 1983. – Vol. 11. – P. 229 -241.

149. Chang, D.Y. Extent analysis and synthetic decision [Text] / D.Y. Chang // Optimization Techniques and Applications. World Scientific. – 1992. – Vol. 1. – P. 352-355.

150. Chang, D. Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP [Text] / D. Y. Chang // European Journal of Operational Research, 1996. – Vol. 95. – P. 649-655.

151. Вержбицкий, В. М. Основы численных методов [Текст] : учебник для вузов / В.М. Вержбицкий. – М. : Высш. шк., 2002. – 840 с.

152. Тонков, Ю. Л. Разработка математических моделей идентификации категории технического состояния строительных конструкций на основе нечеткой логики [Текст] / Ю. Л. Тонков // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018. – Т. 16, № 1. – С. 45-52.

153. Додж, М. Эффективная работа. Microsoft Office Excel 2003 [Текст] / Марк Додж, Крейг Стинсон ; [пер. с англ. В. Широков, Е. Васильев, М. Малышева]. – СПб. : Питер, 2005. – 1088 с.

154. Уокенбах, Джон. Формулы в Microsoft Excel 2013 [Текст] / Джон Уокенбах ; [пер. с англ. и ред. А. Г. Сысолюк]. – Москва [и др.] : Диалектика, 2014. – 716 с.

155. Свидетельство 2018615097 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. «Категория технического состояния изгибаемой железобетонной конструкции (КТС–ИЖБК)» [Текст] / Ю. Л. Тонков, Г. Г. Кашеварова ; правообладатель ФГБОУ ВО «ПНИПУ». – № 2018615097 ; заявл. 12.03.18 ; опубл. 24.04.18.

156. Кашеварова, Г. Г. Численные методы решения задач строительства на ЭВМ [Текст] : учебное пособие / Г. Г. Кашеварова, Т. Б. Пермякова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Пермь : Перм. гос. техн. ун-т, 2003. – 352 с.

157. Соколов, В. А. Диагностический вес признаков и диагностическая ценность обследования при распознавании состояний элементов строительных систем [Текст] / В. А. Соколов // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 3. – С. 27-31.

158. Соколов, В. А. Оценка технического состояния элементов строительных систем с использованием вероятностных методов распознавания [Текст] / В. А. Соколов // Наука и Безопасность. – 2011. – № 1(09). – С. 2-7.

## Приложение А

### Фрагменты онтографа «Техническое состояние железобетонной изгибаемой конструкции»

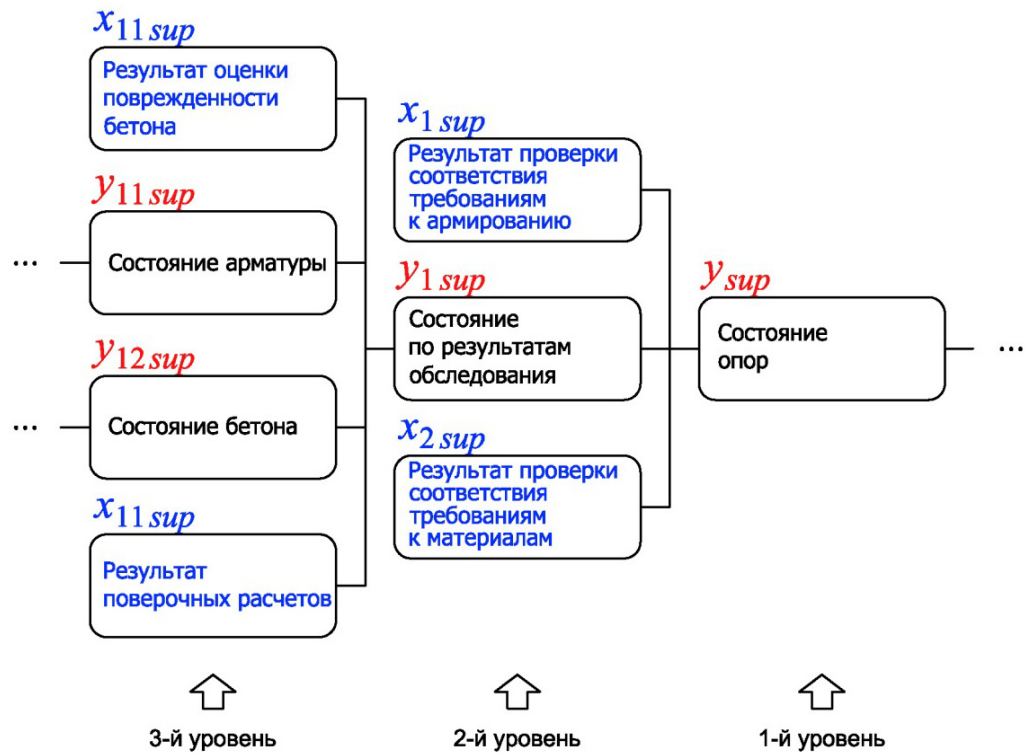


Рисунок А.1 – Фрагмент онтографа онтологии категориального уровня  
«Состояние опор»

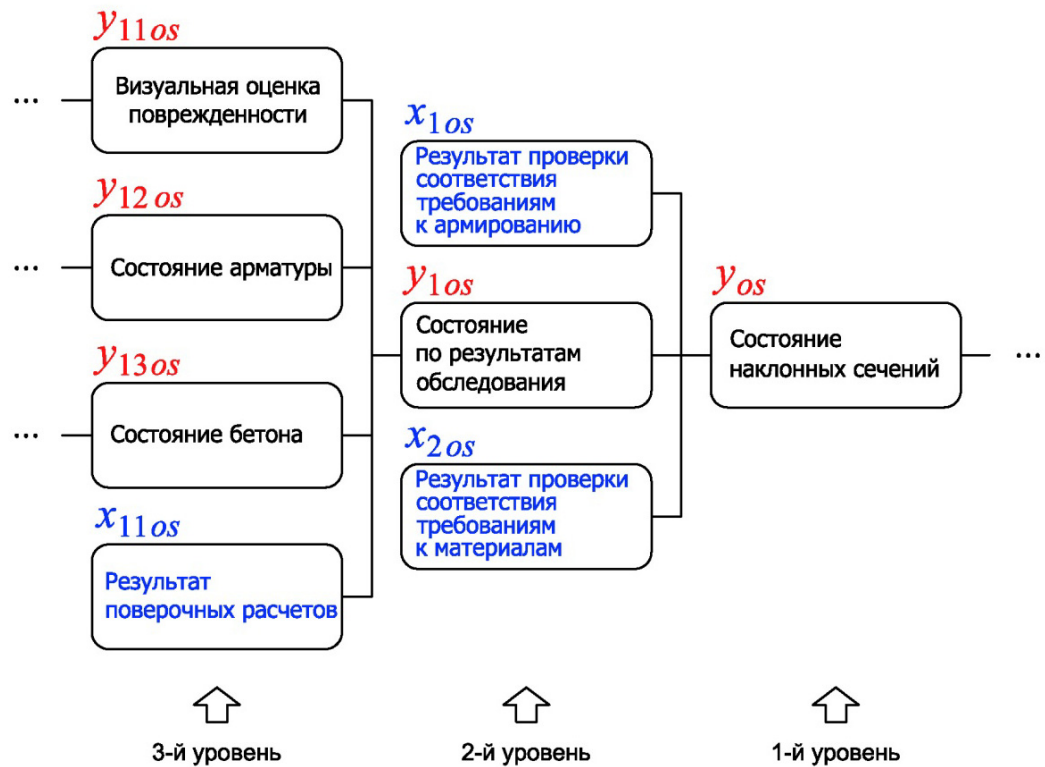


Рисунок А.2 – Фрагмент онтографа онтологии категориального уровня

«Состояние наклонных сечений»

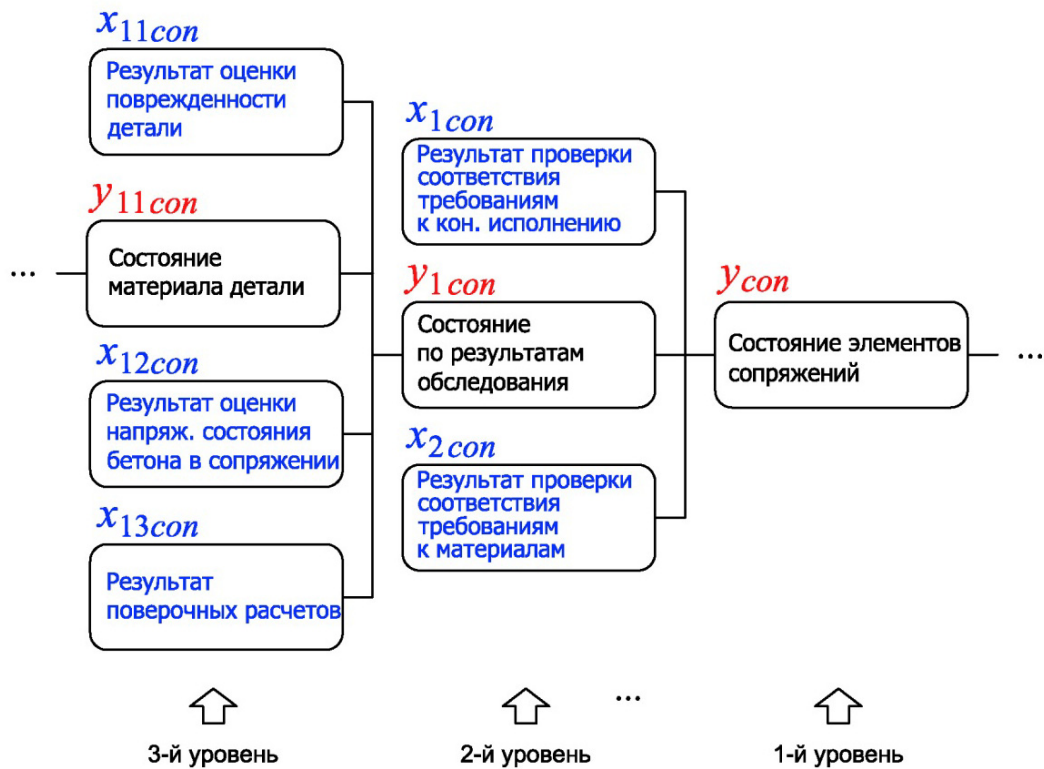


Рисунок А.3 – Фрагмент онтографа онтологии категориального уровня

«Состояние элементов сопряжений»

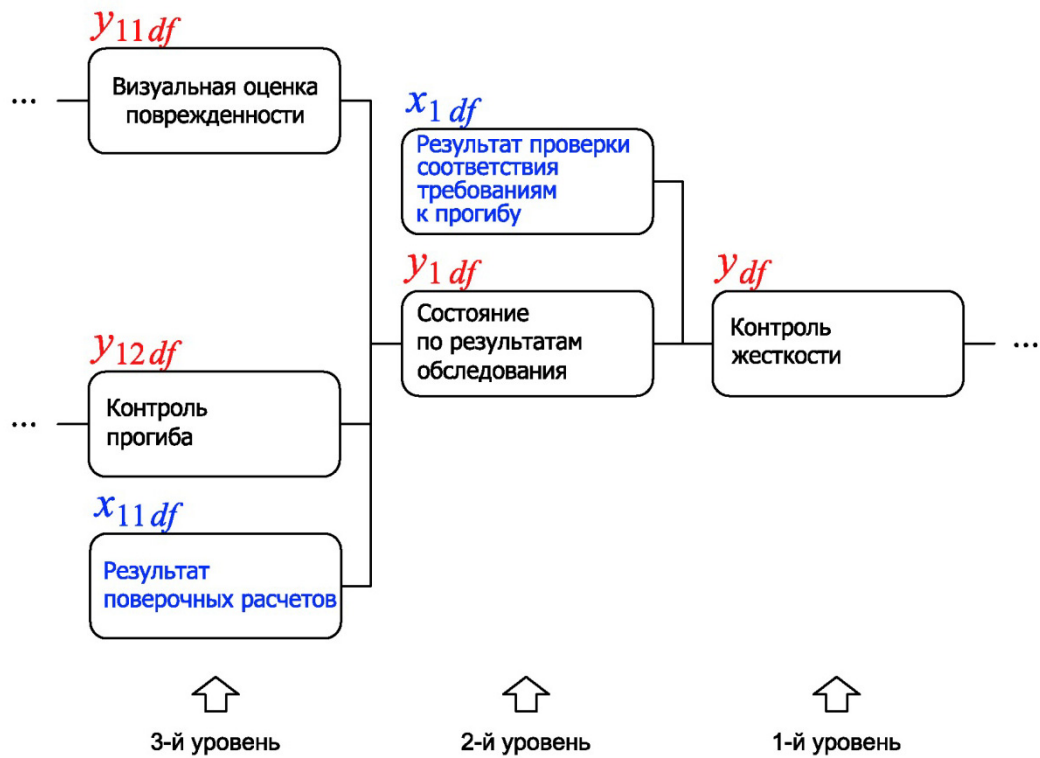


Рисунок А.4 – Фрагмент онтографа онтологии категориального уровня

«Контроль жесткости»

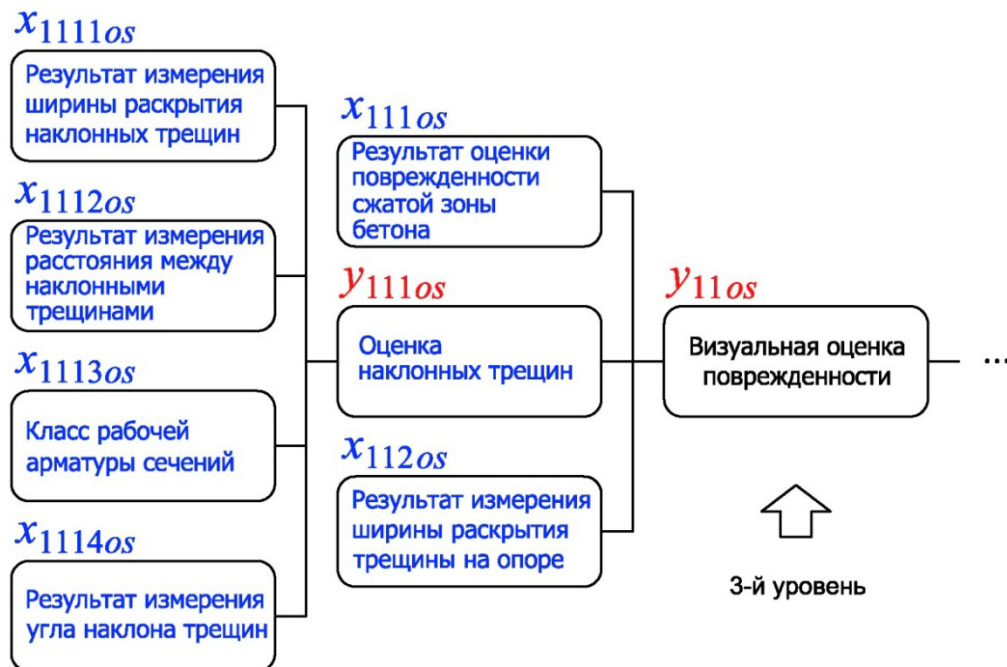


Рисунок А.5 – Онтограф онтологии «Визуальная оценка поврежденности», как части содержимого онтологии «Состояние наклонных сечений»

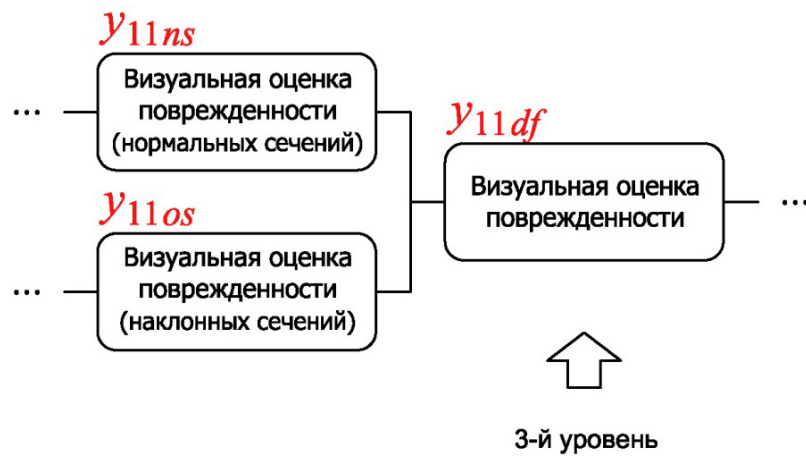


Рисунок А.6 – Онтограф онтологии «Визуальная оценка поврежденности», как части содержимого онтологии «Контроль жесткости»

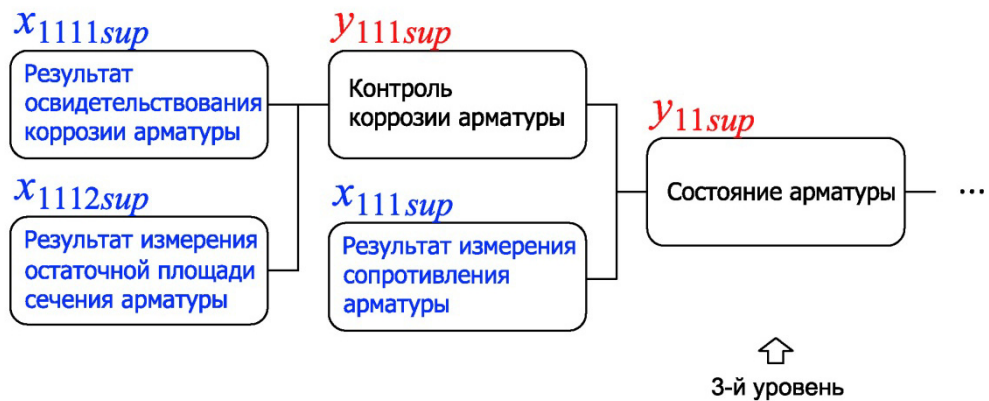


Рисунок А.7 – Онтограф онтологии «Состояние арматуры», как части содержимого онтологии «Состояние опор»



Рисунок А.8 – Фрагмент онтографа онтологии «Состояние арматуры», как части содержимого онтологии «Состояние наклонных сечений» а8



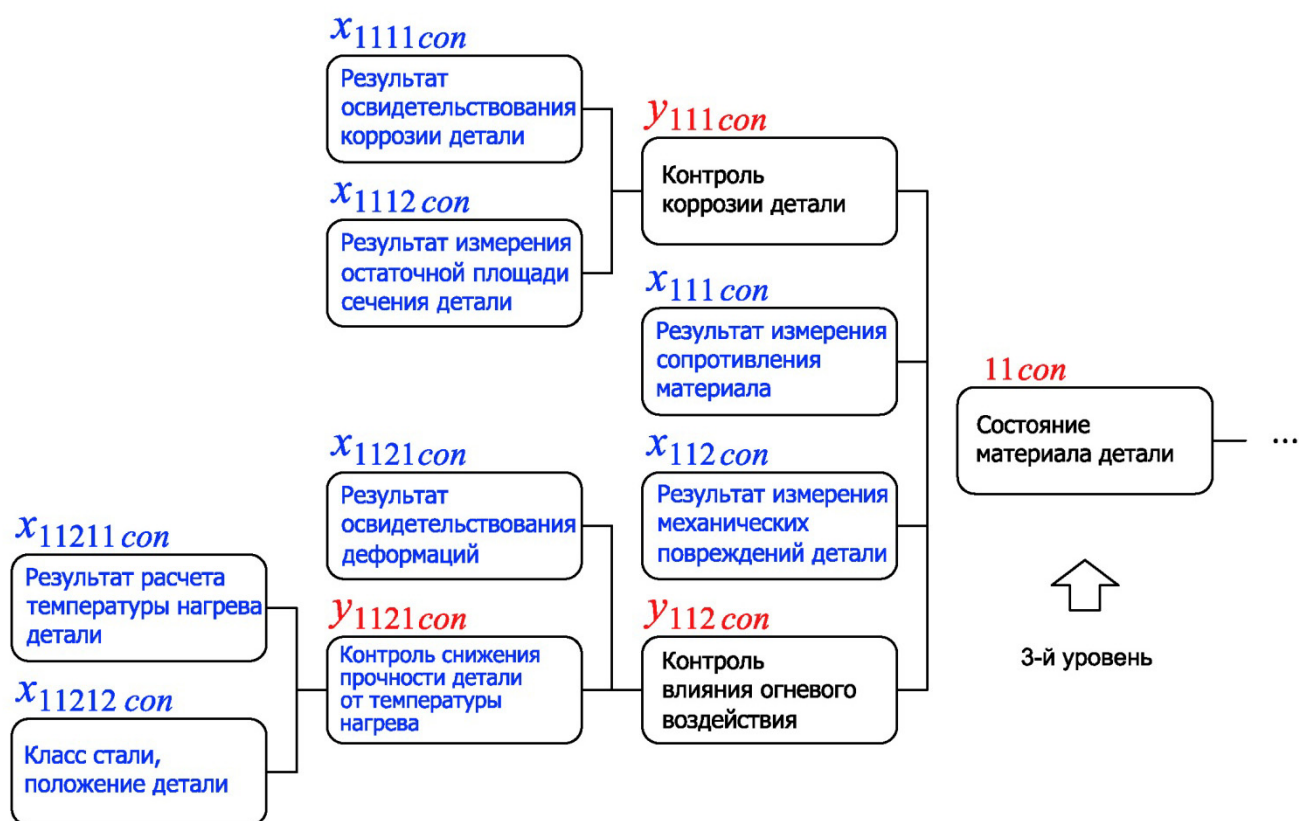


Рисунок А.9 – Фрагмент онтографа онтологии «Состояние стали детали», как части содержимого «Состояние закладных деталей и связей» а9

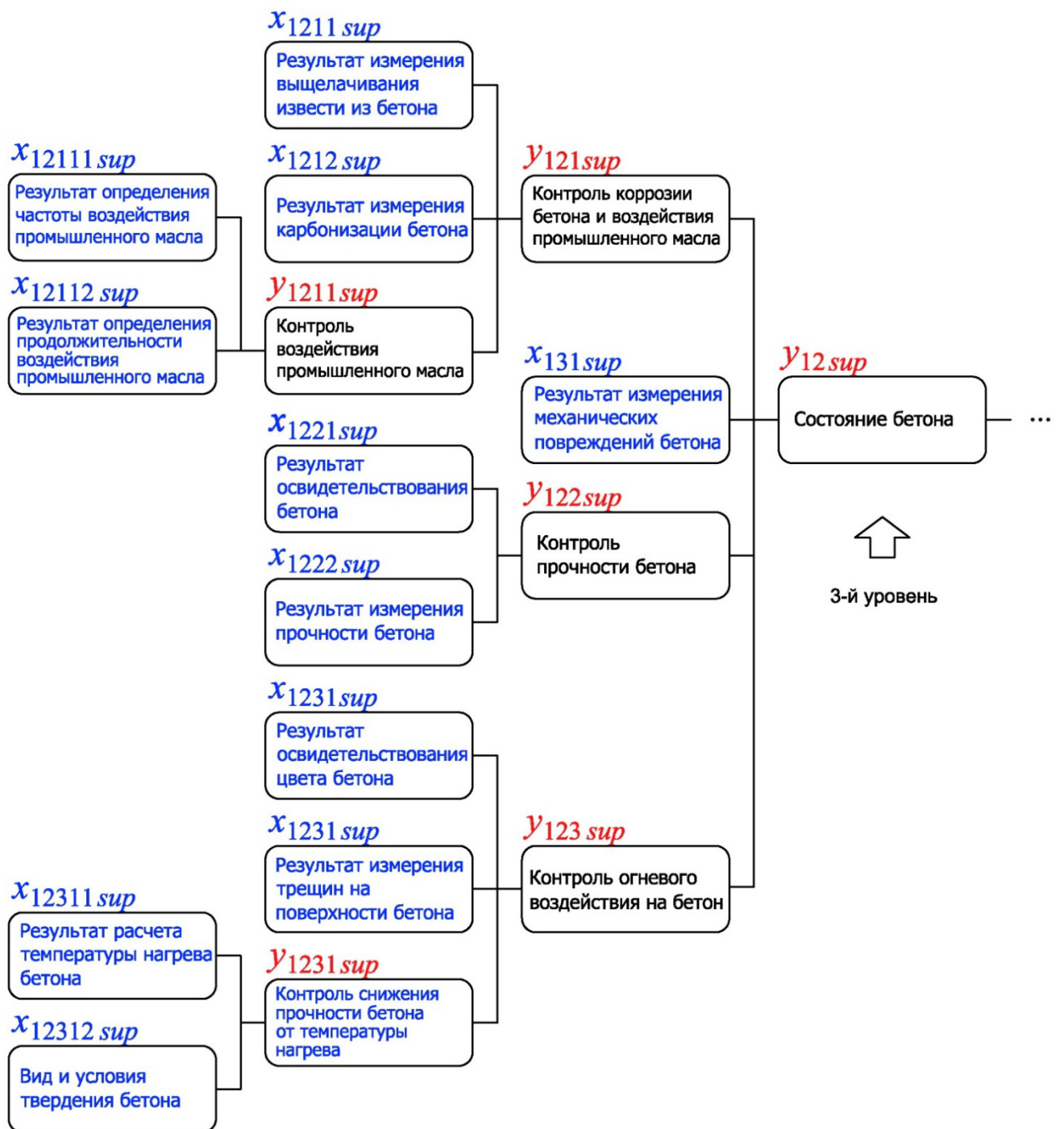


Рисунок А.10 – Фрагмент онтографа онтологии «Состояние бетона», как части содержимого онтологии «Состояние наклонных сечений»

Рисунок А.11 – Фрагмент онтографа онтологии «Состояние бетона», как части  
содержимого онтологии «Состояние наклонных сечений»

## Приложение Б

### Примеры описания лингвистических переменных подсистемы

#### «Состояние нормальных сечений»

Таблица Б.1 – Лингвистическая переменная  $x_{1ns}$  «Результат проверки соответствия требованиям к армированию»

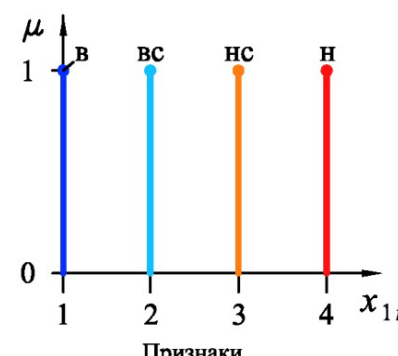
|                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|----------|
| Описание информации, воспринимаемой переменной                                       | Класс признаков соответствия / несоответствия требованиям к армированию                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                 |                 |          |
| Универсальное множество переменной (тип)                                             | дискретное                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                 |                 |          |
| Значения элементов универсального множества переменной                               | $\{1; 2; 3; 4\}$<br>«1» – класс признаков полностью удовлетворяющих нормативным требованиям к армированию;<br>«2» – класс признаков, не удовлетворяющих нормативным требованиям, но соответствующих ранее действующим нормам;<br>«3» – класс признаков, не удовлетворяющих современным и ранее действующим нормативным требованиям, но не способствующих внезапному ухудшению технического состояния конструкции;<br>«4» – класс признаков, не удовлетворяющих современным и ранее действующим нормативным требованиям, свидетельствующих о возможном (внезапном) ухудшении технического состояния конструкции |                 |                 |          |
| Единицы измерения                                                                    | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                 |                 |          |
| Шкала измерения                                                                      | номинальная                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                 |                 |          |
| Количество термов                                                                    | 4 терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                 |                 |          |
| Графики функций принадлежности термов                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |          |
|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |          |
| Характеристики термов                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |          |
| Название терма                                                                       | «высокий»                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | «выше среднего» | «ниже среднего» | «низкий» |
| Обозначение терма                                                                    | в                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | вс              | нс              | н        |
| Четкость терма                                                                       | четкий                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | четкий          | четкий          | четкий   |
| Носитель терма                                                                       | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2               | 3               | 4        |
| 0,5-сечение терма                                                                    | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | –               | –               | –        |
| Ядро терма                                                                           | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2               | 3               | 4        |

Таблица Б.2 – Лингвистическая переменная  $x_{11ns}$  «*Результат поверочных расчетов*»

|                                                        |                                                                 |                 |                 |          |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|----------|
| Описание информации, воспринимаемой переменной         | снижение несущей способности по результатам поверочных расчетов |                 |                 |          |
| Универсальное множество переменной (тип)               | непрерывное                                                     |                 |                 |          |
| Значения элементов универсального множества переменной | [0; 30]                                                         |                 |                 |          |
| Единицы измерения                                      | %                                                               |                 |                 |          |
| Шкала измерения                                        | относительная                                                   |                 |                 |          |
| Количество термов                                      | 4 терма                                                         |                 |                 |          |
| Графики функций принадлежности термов                  |                                                                 |                 |                 |          |
|                                                        |                                                                 |                 |                 |          |
| Расчетное перенапряжение, %                            |                                                                 |                 |                 |          |
| Характеристики термов                                  |                                                                 |                 |                 |          |
| Название терма                                         | «высокий»                                                       | «выше среднего» | «ниже среднего» | «низкий» |
| Обозначение терма                                      | В                                                               | ВС              | НС              | Н        |
| Четкость терма                                         | четкий                                                          | нечеткий        | нечеткий        | нечеткий |
| Носитель терма                                         | 0                                                               | (0; 10]         | (0; 30]         | [10; 30] |
| Название терма                                         | «высокий»                                                       | «выше среднего» | «ниже среднего» | «низкий» |
| 0,5-сечение терма                                      | —                                                               | (0; 5)          | [5; 25]         | [25; 30] |
| Ядро терма                                             | 0                                                               | —               | 10              | 30       |

Таблица Б.3 – Лингвистическая переменная  $x_{1111ns}$  «*Результат измерения ширины раскрытия нормальных трещин*»

|                                                        |                                                     |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Описание информации контролируемого параметра          | Ширина раскрытия нормальных трещин ( $x_{1111ns}$ ) |
| Универсальное множество переменной (тип)               | непрерывное                                         |
| Значения элементов универсального множества переменной | [0; $1,25a_{cre,ult2}$ ]                            |

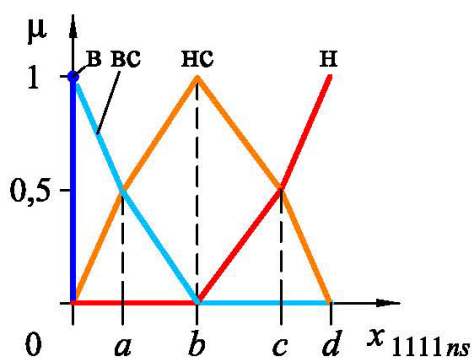
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |          |                                              |                                         |                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Единицы измерения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |          | мм                                           |                                         |                                                             |
| Шкала измерения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |          | относительная                                |                                         |                                                             |
| Количество термов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |          | 4 терма                                      |                                         |                                                             |
| Графики функций принадлежности термов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |          |                                              |                                         |                                                             |
| <div><p>Ширина раскрытия трещины, мм</p></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |          |                                              |                                         |                                                             |
| Характеристики термов при $a_{crc,ult1} < a_{crc,ult2}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |          |                                              |                                         |                                                             |
| Название терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | высокий» | «выше среднего»                              | «ниже среднего»                         | «низкий»                                                    |
| Носитель терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0        | $(0; 0,05]$                                  | $[0; 1,25a_{crc,ult2}]$                 | $[\frac{a_{crc,ult1} + a_{crc,ult2}}{2}; 1,25a_{crc,ult2}]$ |
| 0,5-сечение терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | —        | $(0; \frac{a_{crc,ult1} + a_{crc,ult2}}{2}]$ | $[a_{crc,ult1}; a_{crc,ult2}]$          | $[a_{crc,ult2}; 1,25a_{crc,ult2}]$                          |
| Ядро терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0        | —                                            | $\frac{a_{crc,ult1} + a_{crc,ult2}}{2}$ | $1,25a_{crc,ult2}$                                          |
| Характеристики термов при $a_{crc,ult1} \geq a_{crc,ult2}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |          |                                              |                                         |                                                             |
| Название терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | высокий» | «выше среднего»                              | «ниже среднего»                         | «низкий»                                                    |
| Обозначение терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | В        | ВС                                           | НС                                      | Н                                                           |
| Четкость терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | четкий   | нечеткий                                     | нечеткий                                | нечеткий                                                    |
| Носитель терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0        | $(0; 0,875a_{crc,ult2}]$                     | $[0; 1,25a_{crc,ult2}]$                 | $[0,875a_{crc,ult2}; 1,25a_{crc,ult2}]$                     |
| 0,5-сечение терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | —        | $(0; 0,75a_{crc,ult2}]$                      | $[0,75a_{crc,ult2}; a_{crc,ult2}]$      | $[a_{crc,ult2}; 1,25a_{crc,ult2}]$                          |
| Ядро терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0        | —                                            | $0,875a_{crc,ult2}$                     | $1,25a_{crc,ult2}$                                          |
| <div><div></div><div>1 <math>a_{crc,ult1}</math> – предельная ширина раскрытия трещин из условия сохранности арматуры.</div><div>2 <math>a_{crc,ult2}</math> – предельная ширина раскрытия трещин из условия прочности арматуры.</div><div>3 <math>a_{crc,ult1}</math> и <math>a_{crc,ult2}</math> определяются по значениям контролируемых параметров <math>x_{1112ns}</math>, <math>x_{1113ns}</math>, <math>x_{1114ns}</math> (см. главу 2).</div></div> |          |                                              |                                         |                                                             |

Таблица Б.4 – Лингвистическая переменная  $x_{1211ns}$  «Результат освидетельствования коррозии арматуры»

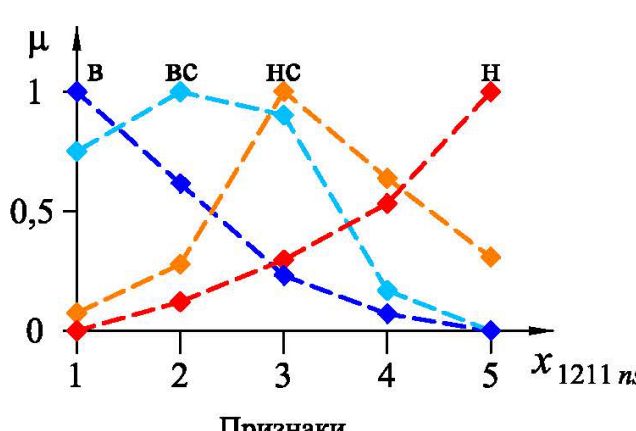
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|-------------------|---|----|----|---|----------------|--------|----------|----------|----------|----------|---|-------|-------|---|----------|-------|---|-------|---|----------|-------|-------|---|-------|----------|-------|-------|-------|-------|----------|---|-------|-------|---|
| Описание информации, воспринимаемой переменной                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Класс признаков (визуальных), характеризующих степень повреждения арматуры коррозией                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| Универсальное множество переменной (тип)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | дискретное                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| Значения элементов универсального множества переменной                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $\{1, 2, 3, 4, 5\}$<br>«1» – поверхность арматуры чистая (при вскрытии);<br>«2» – локальные участки повреждения арматуры поверхностной коррозией (точки и пятна коррозии);<br>«3» – сплошная поверхностная коррозия арматуры;<br>«4» – локальные участки язвенной, пластинчатой коррозии арматуры, растрескивания защитного слоя бетона;<br>«5» – пластинчатая коррозия арматуры, растрескивание и выдавливание защитного слоя бетона продуктами коррозии. |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| Единицы измерения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| Шкала измерения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | номинальная                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| Количество термов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 4 терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| <p>Графики функций принадлежности термов</p>  <p>Признаки</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| <p>Характеристики термов</p> <table><tr><td>Название терма</td><td>«высокий»</td><td>«выше среднего»</td><td>«ниже среднего»</td><td>«низкий»</td></tr><tr><td>Обозначение терма</td><td>В</td><td>ВС</td><td>НС</td><td>Н</td></tr><tr><td>Четкость терма</td><td>четкий</td><td>нечеткий</td><td>нечеткий</td><td>нечеткий</td></tr><tr><td><math>\mu(1)</math></td><td>1</td><td>0,676</td><td>0,149</td><td>0</td></tr><tr><td><math>\mu(2)</math></td><td>0,819</td><td>1</td><td>0,782</td><td>0</td></tr><tr><td><math>\mu(3)</math></td><td>0,575</td><td>0,905</td><td>1</td><td>0,413</td></tr><tr><td><math>\mu(4)</math></td><td>0,016</td><td>0,335</td><td>0,800</td><td>0,781</td></tr><tr><td><math>\mu(5)</math></td><td>0</td><td>0,012</td><td>0,166</td><td>1</td></tr></table> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Название терма  | «высокий»       | «выше среднего» | «ниже среднего» | «низкий» | Обозначение терма | В | ВС | НС | Н | Четкость терма | четкий | нечеткий | нечеткий | нечеткий | $\mu(1)$ | 1 | 0,676 | 0,149 | 0 | $\mu(2)$ | 0,819 | 1 | 0,782 | 0 | $\mu(3)$ | 0,575 | 0,905 | 1 | 0,413 | $\mu(4)$ | 0,016 | 0,335 | 0,800 | 0,781 | $\mu(5)$ | 0 | 0,012 | 0,166 | 1 |
| Название терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | «высокий»                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | «выше среднего» | «ниже среднего» | «низкий»        |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| Обозначение терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | В                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | ВС              | НС              | Н               |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| Четкость терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | четкий                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | нечеткий        | нечеткий        | нечеткий        |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| $\mu(1)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,676           | 0,149           | 0               |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| $\mu(2)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,819                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1               | 0,782           | 0               |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| $\mu(3)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,575                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0,905           | 1               | 0,413           |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| $\mu(4)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,016                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0,335           | 0,800           | 0,781           |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |
| $\mu(5)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,012           | 0,166           | 1               |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |       |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |       |       |       |       |          |   |       |       |   |



Таблица Б.5 – Лингвистическая переменная  $x_{1311ns}$  «Результат измерения выщелачивания извести из бетона»

|                                                        |                                 |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Описание информации, воспринимаемой переменной         | Выщелачивание извести из бетона |
| Универсальное множество переменной (тип)               | непрерывное                     |
| Значения элементов универсального множества переменной | [0; 24]                         |
| Единицы измерения                                      | %                               |
| Шкала измерения                                        | относительная                   |
| Количество термов                                      | 4 терма                         |

Графики функций принадлежности термов

| Характеристики термов |           |                 |                 |          |
|-----------------------|-----------|-----------------|-----------------|----------|
| Название терма        | «высокий» | «выше среднего» | «ниже среднего» | «низкий» |
| Обозначение терма     | В         | ВС              | НС              | Н        |
| Четкость терма        | четкий    | нечеткий        | нечеткий        | нечеткий |
| Носитель терма        | 0         | (0; 16]         | [0; 24]         | [16; 24] |
| 0,5-сечение терма     | –         | (0; 8]          | [8; 20]         | [20; 24] |
| Ядро терма            | 0         | –               | 16              | 24       |



Таблица Б.6 – Лингвистическая переменная  $x_{1342ns}$  «Результат освидетельствования поверхности бетона»

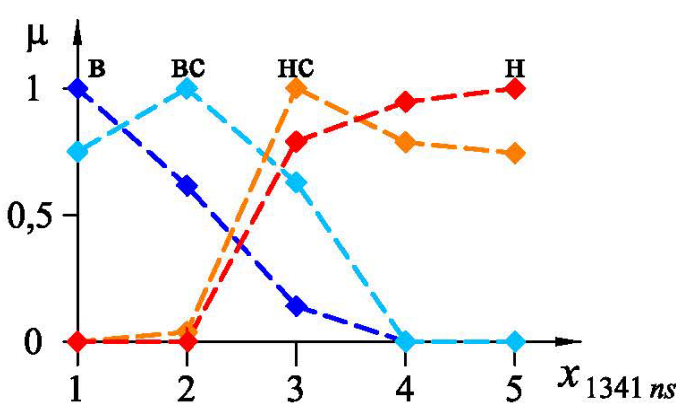
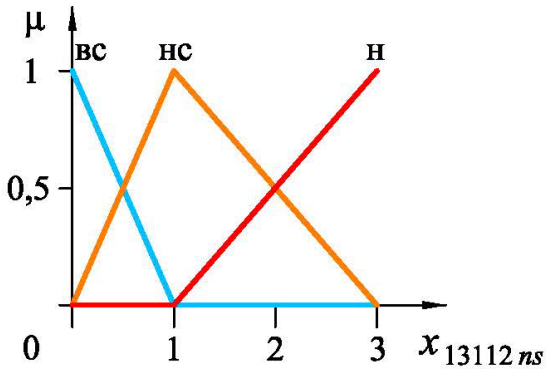
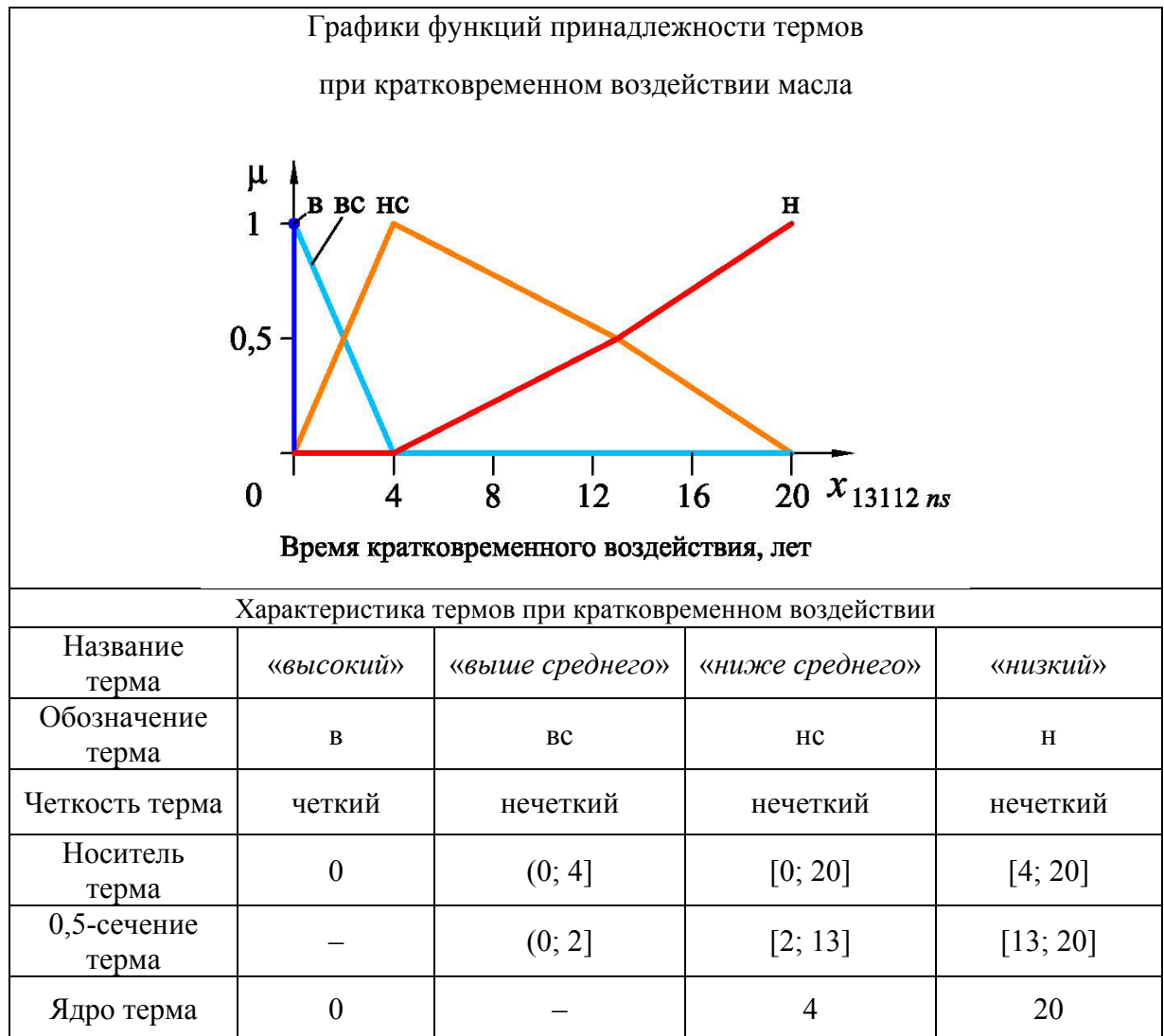
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|-------------------|---|----|----|---|----------------|--------|----------|----------|----------|----------|---|-------|---|---|----------|-------|---|-------|---|----------|-------|-------|---|-------|----------|---|---|------|-------|----------|---|---|------|---|
| Описание информации, воспринимаемой переменной                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Класс признаков (визуальных), характеризующих степень повреждения бетона огневым воздействием                                                                                                                                                                                                                                                            |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| Универсальное множество переменной (тип)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | дискретное                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| Значения элементов универсального множества переменной                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $\{1, 2, 3, 4, 5\}$<br>«1» – цвет нормальный;<br>«2»– цвет бетона – без изменений, пятна сажи<br>«3» – цвет бетона содержит розоватый оттенок; поверхностные трещины;<br>«4» – цвет бетона от розового до красного; глубокие поверхностные трещины;<br>«5» – цвет бетона содержит оттенки серого, желтого, черного; отколы бетона, крошение заполнителя. |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| Единицы измерения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| Шкала измерения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | номинальная                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| Количество термов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 4 терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| <p>Графики функций принадлежности термов</p>  <p>Признаки</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                 |                 |                 |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| <p>Характеристики термов</p> <table><tr><td>Название терма</td><td>«высокий»</td><td>«выше среднего»</td><td>«ниже среднего»</td><td>«низкий»</td></tr><tr><td>Обозначение терма</td><td>в</td><td>вс</td><td>нс</td><td>н</td></tr><tr><td>Четкость терма</td><td>четкий</td><td>нечеткий</td><td>нечеткий</td><td>нечеткий</td></tr><tr><td><math>\mu(1)</math></td><td>1</td><td>0,704</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td><math>\mu(2)</math></td><td>0,678</td><td>1</td><td>0,036</td><td>0</td></tr><tr><td><math>\mu(3)</math></td><td>0,124</td><td>0,572</td><td>1</td><td>0,637</td></tr><tr><td><math>\mu(4)</math></td><td>0</td><td>0</td><td>0,76</td><td>0,924</td></tr><tr><td><math>\mu(5)</math></td><td>0</td><td>0</td><td>0,73</td><td>1</td></tr></table> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Название терма  | «высокий»       | «выше среднего» | «ниже среднего» | «низкий» | Обозначение терма | в | вс | нс | н | Четкость терма | четкий | нечеткий | нечеткий | нечеткий | $\mu(1)$ | 1 | 0,704 | 0 | 0 | $\mu(2)$ | 0,678 | 1 | 0,036 | 0 | $\mu(3)$ | 0,124 | 0,572 | 1 | 0,637 | $\mu(4)$ | 0 | 0 | 0,76 | 0,924 | $\mu(5)$ | 0 | 0 | 0,73 | 1 |
| Название терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | «высокий»                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | «выше среднего» | «ниже среднего» | «низкий»        |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| Обозначение терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | в                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | вс              | нс              | н               |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| Четкость терма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | четкий                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | нечеткий        | нечеткий        | нечеткий        |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| $\mu(1)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0,704           | 0               | 0               |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| $\mu(2)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,678                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 1               | 0,036           | 0               |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| $\mu(3)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,124                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0,572           | 1               | 0,637           |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| $\mu(4)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0               | 0,76            | 0,924           |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |
| $\mu(5)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0               | 0,73            | 1               |                 |          |                   |   |    |    |   |                |        |          |          |          |          |   |       |   |   |          |       |   |       |   |          |       |       |   |       |          |   |   |      |       |          |   |   |      |   |

Таблица Б.7 – Лингвистическая переменная  $x_{13111ns}$  «Интенсивность воздействия промышленного масла»

|                                                                                                        |                                                                        |                 |                 |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|----------|
| Описание информации, воспринимаемой переменной                                                         | Интенсивность попадания промышленного масла на поверхность конструкции |                 |                 |          |
| Универсальное множество переменной (тип)                                                               | непрерывное                                                            |                 |                 |          |
| Значения элементов универсального множества переменной                                                 | [0; 6]                                                                 |                 |                 |          |
| Единицы измерения                                                                                      | количество раз в год                                                   |                 |                 |          |
| Шкала измерения                                                                                        | относительная                                                          |                 |                 |          |
| Количество термов                                                                                      | 4 терма                                                                |                 |                 |          |
| <div>Графики функций принадлежности термов</div> <p>Интенсивность воздействия пром. масла, раз/год</p> |                                                                        |                 |                 |          |
| Характеристики термов                                                                                  |                                                                        |                 |                 |          |
| Название терма                                                                                         | «высокий»                                                              | «выше среднего» | «ниже среднего» | «низкий» |
| Обозначение терма                                                                                      | в                                                                      | вс              | нс              | н        |
| Четкость терма                                                                                         | четкий                                                                 | нечеткий        | нечеткий        | нечеткий |
| Носитель терма                                                                                         | 0                                                                      | (0; 1]          | [0; 6]          | [1; 6]   |
| 0,5-сечение терма                                                                                      | –                                                                      | (0; 0,5]        | [0,5; 4]        | [4; 6]   |
| Ядро терма                                                                                             | 0                                                                      | –               | 1               | 6        |

Таблица Б.8 – Лингвистическая переменная  $x_{13112ns}$  «Продолжительность воздействия промышленного масла»

|                                                                                                                                                                                                               |                                                                                    |                 |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------|
| Описание информации, воспринимаемой переменной                                                                                                                                                                | Время воздействия промышленного масла на поверхность конструкции                   |                 |          |
| Универсальное множество переменной (тип)                                                                                                                                                                      | непрерывное                                                                        |                 |          |
| Значения элементов универсального множества переменной                                                                                                                                                        | [0; 3] – при интенсивном воздействии<br>[0; 3] – при кратковременном воздействии   |                 |          |
| Единицы измерения                                                                                                                                                                                             | лет                                                                                |                 |          |
| Шкала измерения                                                                                                                                                                                               | относительная                                                                      |                 |          |
| Количество термов                                                                                                                                                                                             | 3 терма – при интенсивном воздействии<br>4 терма – при кратковременном воздействии |                 |          |
| <p>Графики функций принадлежности термов при интенсивном воздействии масла</p>  <p>Время интенсивного воздействия, лет</p> |                                                                                    |                 |          |
| Характеристика термов при интенсивном воздействии                                                                                                                                                             |                                                                                    |                 |          |
| Название терма                                                                                                                                                                                                | «выше среднего»                                                                    | «ниже среднего» | «низкий» |
| Обозначение терма                                                                                                                                                                                             | вс                                                                                 | нс              | н        |
| Четкость терма                                                                                                                                                                                                | нечеткий                                                                           | нечеткий        | нечеткий |
| Носитель терма                                                                                                                                                                                                | (0; 1]                                                                             | [0; 3]          | [1; 3]   |
| 0,5-сечение терма                                                                                                                                                                                             | (0; 0,5]                                                                           | [0,5; 2]        | [2; 3]   |
| Ядро терма                                                                                                                                                                                                    | –                                                                                  | 1               | 3        |



## Приложение В

### Примеры баз знаний (качественного описания управляющих правил)

Таблица В.1 – Фрагмент базы знаний лингвистической переменной  $y_{131}$ , содержащей 64 управляющих правила

| Номер правила | <i>Если</i> |            |            | <i>То</i> |     |
|---------------|-------------|------------|------------|-----------|-----|
|               | $x_{1311}$  | $x_{1312}$ | $y_{1311}$ | $y_{131}$ | $w$ |
| 1             | в           | в          | в          | в         | 1   |
| 2             | в           | в          | вс         | вс        | 1   |
| 3             | в           | в          | нс         | нс        | 1   |
| 4             | в           | в          | н          | н         | 1   |
| 21            | вс          | вс         | в          | вс        | 1   |
| 22            | вс          | вс         | вс         | вс        | 1   |
| 23            | вс          | вс         | нс         | нс        | 1   |
| 24            | вс          | вс         | н          | н         | 1   |
| 41            | нс          | нс         | в          | нс        | 1   |
| 42            | нс          | нс         | вс         | нс        | 1   |
| 43            | нс          | нс         | нс         | нс        | 1   |
| 44            | нс          | нс         | н          | н         | 1   |
| 61            | н           | н          | в          | н         | 1   |
| 62            | н           | н          | вс         | н         | 1   |
| 63            | н           | н          | нс         | н         | 1   |
| 64            | н           | н          | н          | н         | 1   |

Таблица В.2 – База знаний лингвистической переменной  $y_{1311}$ , содержащая 8 управляющих правил

| Номер правила | <i>Если</i> |                  | <i>То</i>  |     |
|---------------|-------------|------------------|------------|-----|
|               | $x_{13111}$ | $x_{13112}$ (нс) | $y_{1311}$ | $w$ |
| 1             | в           | —                | в          | 1   |
| 2             | вс          | вс               | вс         | 1   |
| 3             | нс          | вс               | вс         | 1   |
| 4             | нс          | нс               | нс         | 1   |
| 5             | нс          | н                | н          | 1   |
|               |             |                  |            |     |
| Номер правила | <i>Если</i> |                  | <i>То</i>  |     |
|               | $x_{13111}$ | $x_{13112}$ (н)  | $y_{1311}$ | $w$ |
| 6             | н           | вс               | вс         | 1   |
| 7             | н           | нс               | нс         | 1   |
| 8             | н           | н                | н          | 1   |

## Приложение Г

### Фрагменты материалов, идентифицирующих программу «КТС-ИЖБК»

```
<?xml version="1.0"?>
<?mso-application progid="Excel.Sheet"?>
<Workbook xmlns="urn:schemas-microsoft-com:office:spreadsheet"
  xmlns:o="urn:schemas-microsoft-com:office:office"
  xmlns:x="urn:schemas-microsoft-com:office:excel"
  xmlns:ss="urn:schemas-microsoft-com:office:spreadsheet"
  xmlns:html="http://www.w3.org/TR/REC-html40">
  <DocumentProperties xmlns="urn:schemas-microsoft-com:office:office">
    <Created>2006-09-16T00:00:00Z</Created>
    <LastSaved>2017-12-22T04:40:39Z</LastSaved>
    <Version>15.00</Version>
  </DocumentProperties>
  <OfficeDocumentSettings xmlns="urn:schemas-microsoft-com:office:office">
    <AllowPNG/>
    <RemovePersonalInformation/>
  </OfficeDocumentSettings>
  <ExcelWorkbook xmlns="urn:schemas-microsoft-com:office:excel">
    <WindowHeight>8070</WindowHeight>
    <WindowWidth>3585</WindowWidth>
    <WindowTopX>0</WindowTopX>
    <WindowTopY>720</WindowTopY>
    <TabRatio>955</TabRatio>
    <ActiveSheet>1</ActiveSheet>
    <FirstVisibleSheet>1</FirstVisibleSheet>
    <ProtectStructure>False</ProtectStructure>
    <ProtectWindows>False</ProtectWindows>
  </ExcelWorkbook>
  <Styles>
    <Style ss:ID="Default" ss:Name="Normal">
      <Alignment ss:Vertical="Bottom"/>
      <Borders/>
      <Font ss:FontName="Calibri" x:Family="Swiss" ss:Size="11" ss:Color="#000000"/>
      <Interior/>
      <NumberFormat/>
      <Protection/>
    </Style>
    <Style ss:ID="s16">
      <Alignment ss:Horizontal="Center" ss:Vertical="Bottom"/>
    </Style>
    <Style ss:ID="s17">
      <NumberFormat ss:Format="Fixed"/>
    </Style>
    <Style ss:ID="s18">
      <Font ss:FontName="Calibri" x:CharSet="204" x:Family="Swiss" ss:Size="11"
        ss:Color="#FF0000" ss:Bold="1"/>
    </Style>
    <Style ss:ID="s19">
      <Font ss:FontName="Calibri" x:Family="Swiss" ss:Size="11" ss:Color="#FF0000"/>
    </Style>
    <Style ss:ID="s20">
      <Font ss:FontName="Calibri" x:Family="Swiss" ss:Size="11" ss:Color="#FF0000"/>
      <NumberFormat ss:Format="Fixed"/>
    </Style>
    <Style ss:ID="s21">
      <Borders/>
    </Style>
    <Style ss:ID="s22">
      <Alignment ss:Horizontal="Center" ss:Vertical="Bottom"/>
      <Borders/>
    </Style>
    <Style ss:ID="s23">
      <Borders/>
      <NumberFormat ss:Format="Fixed"/>
    </Style>
    <Style ss:ID="s24">
      <Font ss:FontName="Calibri" x:CharSet="204" x:Family="Swiss" ss:Size="11"
        ss:Color="#00B050" ss:Bold="1"/>
    </Style>
    <Style ss:ID="s25">
      <Font ss:FontName="Calibri" x:Family="Swiss" ss:Size="11" ss:Color="#0070C0"/>
    </Style>
    <Style ss:ID="s26">
      <Font ss:FontName="Calibri" x:Family="Swiss" ss:Size="11" ss:Color="#C00000"/>
    </Style>
```

```

</Style>
<Style ss:ID="s27">
  <Alignment ss:Horizontal="Center" ss:Vertical="Bottom"/>
  <Font ss:FontName="Calibri" x:Family="Swiss" ss:Size="11" ss:Color="#C00000"/>
</Style>
<Style ss:ID="s28">
  <Alignment ss:Horizontal="Center" ss:Vertical="Bottom"/>
  <Font ss:FontName="Calibri" x:Family="Swiss" ss:Size="11" ss:Color="#00B050"/>
</Style>

<Worksheet ss:Name="HJBM y11">
<Table ss:ExpandedColumnCount="510" ss:ExpandedRowCount="85" x:FullColumns="1"
x:FullRows="1" ss:DefaultRowHeight="15">
  <Column ss:Index="6" ss:StyleID="s52" ss:AutoFitWidth="0"/>
  <Column ss:Index="8" ss:StyleID="s53" ss:AutoFitWidth="0" ss:Width="24.75"
    ss:Span="500"/>
  <Row>
    <Cell ss:Index="8"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.01</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.02</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.03</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.04</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.05</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">6.000000000000005E-2</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">7.000000000000007E-2</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.08</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.09</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">9.999999999999992E-2</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.1099999999999999</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.1199999999999998</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.1299999999999998</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.1399999999999999</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.15</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.16</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.17</Data></Cell>
    <Cell ss:Formula="=RC[-1]+0.01"><Data ss:Type="Number">0.1800000000000002</Data></Cell>
  </Row>
</Table>

<Worksheet ss:Name="E3B y11">
  <Names>
    <NamedRange ss:Name="solver_cvg" ss:RefersTo="=0.000000001" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_drv" ss:RefersTo="=1" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_eng" ss:RefersTo="=3" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_est" ss:RefersTo="=1" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_itr" ss:RefersTo="=100000" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_lhs1" ss:RefersTo="='E3B y11'!R34C6" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_lhs2" ss:RefersTo="='E3B y11'!R35C6" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_mip" ss:RefersTo="=2147483647" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_mni" ss:RefersTo="=30" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_mrt" ss:RefersTo="=0.075" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_msl" ss:RefersTo="=2" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_neg" ss:RefersTo="=1" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_nod" ss:RefersTo="=2147483647" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_num" ss:RefersTo="=0" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_nwt" ss:RefersTo="=1" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_opt" ss:RefersTo="='E3B y11'!R24C5" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_pre" ss:RefersTo="=0.0000000001" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_rbv" ss:RefersTo="=1" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_rell1" ss:RefersTo="=2" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_rell2" ss:RefersTo="=2" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_rhs1" ss:RefersTo="=14" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_rhs2" ss:RefersTo="=-7" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_rlx" ss:RefersTo="=1" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_rsd" ss:RefersTo="=0" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_scl" ss:RefersTo="=1" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_sho" ss:RefersTo="=1" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_ssz" ss:RefersTo="=10000" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_tim" ss:RefersTo="=100" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_tol" ss:RefersTo="=0.005" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_typ" ss:RefersTo="=1" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_val" ss:RefersTo="=0" ss:Hidden="1"/>
    <NamedRange ss:Name="solver_ver" ss:RefersTo="=3" ss:Hidden="1"/>
  </Names>
  <Table ss:ExpandedColumnCount="25" ss:ExpandedRowCount="103" x:FullColumns="1"
x:FullRows="1" ss:DefaultRowHeight="15">
    <Column ss:Index="2" ss:AutoFitWidth="0" ss:Width="49.5"/>
    <Column ss:AutoFitWidth="0" ss:Width="52.5"/>
    <Column ss:Index="5" ss:AutoFitWidth="0" ss:Width="54.75"/>
    <Column ss:AutoFitWidth="0" ss:Width="52.5"/>
    <Column ss:AutoFitWidth="0" ss:Width="50.25"/>
    <Column ss:Index="12" ss:AutoFitWidth="0" ss:Width="47.25"/>
  </Table>
</Worksheet>

```

```

<Column ss:AutoFitWidth="0" ss:Width="50.25"/>
<Column ss:Index="16" ss:AutoFitWidth="0" ss:Width="50.25"/>
<Row ss:Index="5">
  <Cell ss:Index="11" ss:StyleID="s16"/>
</Row>
<Row>
  <Cell ss:Index="3" ss:StyleID="s16"><Data ss:Type="Number">1</Data></Cell>
  <Cell ss:StyleID="s16"><Data ss:Type="Number">2</Data></Cell>
  <Cell ss:StyleID="s16"><Data ss:Type="Number">3</Data></Cell>
  <Cell ss:StyleID="s16"><Data ss:Type="Number">4</Data></Cell>
  <Cell ss:Index="8" ss:StyleID="s16"><Data ss:Type="String">Знач.</Data></Cell>
  <Cell ss:StyleID="s16"/>
  <Cell ss:StyleID="s16"><Data ss:Type="String">Сингл.</Data></Cell>
  <Cell ss:StyleID="s16"><Data ss:Type="String">Мамд.</Data></Cell>
</Row>
<Row>
  <Cell ss:Index="3" ss:StyleID="s16"><Data ss:Type="String">в</Data></Cell>
  <Cell ss:StyleID="s16"><Data ss:Type="String">вс</Data></Cell>
  <Cell ss:StyleID="s16"><Data ss:Type="String">нс</Data></Cell>
  <Cell ss:StyleID="s16"><Data ss:Type="String">н</Data></Cell>
  <Cell ss:Index="11" ss:StyleID="s16"/>
</Row>

<Row>
<Cell ss:StyleID="s16"/>
<Cell ss:StyleID="s16"/>
<Cell ss:StyleID="s79"><Data ss:Type="String">x1113</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s65" ss:Formula="R[-1]C+1"><Data ss:Type="Number">7</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s39"><Data ss:Type="String">Класс рабочей арматуры сечения</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s57"/>
<Cell ss:StyleID="s39"/>
<Cell ss:StyleID="s39"/>
<Cell ss:Index="11" ss:StyleID="s33"/>
<Cell ss:StyleID="s89"><Data ss:Type="Number">3</Data></Cell>
<Cell><Data ss:Type="String">Класс: 1; 2; 3; 4; 5</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s33"/>
<Cell ss:StyleID="s155"><Data ss:Type="Number">1</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s89"><Data ss:Type="Number">3</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s166"><Data ss:Type="Number">3</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s166"><Data ss:Type="Number">3</Data></Cell>
<Cell ss:Index="21" ss:StyleID="s163"><Data ss:Type="Number">3</Data></Cell>
</Row>
<Row>
<Cell ss:StyleID="s16"/>
<Cell ss:StyleID="s16"/>
<Cell ss:StyleID="s79"><Data ss:Type="String">x1114</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s65" ss:Formula="R[-1]C+1"><Data ss:Type="Number">8</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s39"><Data ss:Type="String">Предельно-допустимая ширина раскрытия трещин из
условия сохранности</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s57"/>
<Cell ss:StyleID="s39"/>
<Cell ss:StyleID="s39"/>
<Cell ss:Index="11" ss:StyleID="s33"/>
<Cell ss:StyleID="s89"><Data ss:Type="Number">0.3</Data></Cell>
<Cell><Data ss:Type="String">мм</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s33"/>
<Cell ss:StyleID="s155"><Data ss:Type="Number">0.3</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s89"><Data ss:Type="Number">0.3</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s166"><Data ss:Type="Number">0.3</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s166"><Data ss:Type="Number">0.3</Data></Cell>
<Cell ss:Index="21" ss:StyleID="s163"><Data ss:Type="Number">0.3</Data></Cell>
</Row>
<Row>
<Cell ss:StyleID="s16"/>
<Cell ss:StyleID="s16"/>
<Cell ss:StyleID="s79"><Data ss:Type="String">x1211</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s65" ss:Formula="R[-1]C+1"><Data ss:Type="Number">9</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s39"><Data ss:Type="String">Результат освидетельствования коррозии арматуры
сечения</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s57"/>
<Cell ss:StyleID="s39"/>
<Cell ss:StyleID="s39"/>
<Cell ss:Index="11" ss:StyleID="s33"/>
<Cell ss:StyleID="s89"><Data ss:Type="Number">1</Data></Cell>
<Cell><Data ss:Type="String">Класс: 1; 2; 3; 4; 5</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s33"/>
<Cell ss:StyleID="s155"><Data ss:Type="Number">2</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s89"><Data ss:Type="Number">1</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s166"><Data ss:Type="Number">1</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s166"><Data ss:Type="Number">1</Data></Cell>

```



```

    <Cell ss:Index="21" ss:StyleID="s163"><Data ss:Type="Number">1</Data></Cell>
  </Row>
  <Row>
    <Cell ss:StyleID="s16"/>
    <Cell ss:StyleID="s16"/>
    <Cell ss:StyleID="s79"><Data ss:Type="String">x121</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s65" ss:Formula="=R[-1]C+1"><Data ss:Type="Number">10</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s39"><Data ss:Type="String">Результат измерения остаточной площади рабочей
арматуры сечения</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s57"/>
    <Cell ss:StyleID="s39"/>
    <Cell ss:StyleID="s39"/>
    <Cell ss:Index="11" ss:StyleID="s42"/>
    <Cell ss:StyleID="s163"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell><Data ss:Type="String">Снижение: %</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s42"/>
    <Cell ss:StyleID="s155"><Data ss:Type="Number">1</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s163"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s166"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s166"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell ss:Index="21" ss:StyleID="s163"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
  </Row>
  <Row>
    <Cell ss:StyleID="s16"/>
    <Cell ss:StyleID="s16"/>
    <Cell ss:StyleID="s79"><Data ss:Type="String">x121</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s65" ss:Formula="=R[-1]C+1"><Data ss:Type="Number">11</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s39"><Data ss:Type="String">Результат измерения сопротивления рабочей арматуры
сечения</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s63"/>
    <Cell ss:StyleID="s39"/>
    <Cell ss:StyleID="s39"/>
    <Cell ss:Index="11" ss:StyleID="s42"/>
    <Cell ss:StyleID="s150"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell><Data ss:Type="String">Снижение: %</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s26"/>
    <Cell ss:StyleID="s156"><Data ss:Type="Number">2</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s150"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s165"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s165"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell ss:Index="21" ss:StyleID="s150"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
  </Row>

  <Row>
    <Cell ss:StyleID="s16"/>
    <Cell ss:StyleID="s16"/>
    <Cell ss:StyleID="s79"><Data ss:Type="String">x13111</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s65" ss:Formula="=R[-1]C+1"><Data ss:Type="Number">17</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s39"><Data ss:Type="String">Результат определения частоты воздействия масел на
бетон</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s63"/>
    <Cell ss:StyleID="s62"/>
    <Cell ss:StyleID="s63"/>
    <Cell ss:StyleID="s42"/>
    <Cell ss:StyleID="s42"/>
    <Cell ss:StyleID="s42"/>
    <Cell ss:StyleID="s40"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell><Data ss:Type="String">Частота пропитки, раз/лет</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s26"/>
    <Cell ss:StyleID="s156"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s40"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s165"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s165"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
    <Cell ss:Index="21" ss:StyleID="s150"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
  </Row>
  <Row>
    <Cell ss:StyleID="s16"/>
    <Cell ss:StyleID="s16"/>
    <Cell ss:StyleID="s79"><Data ss:Type="String">x13112</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s65" ss:Formula="=R[-1]C+1"><Data ss:Type="Number">18</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s39"><Data ss:Type="String">Результат определения продолжительности воздействия
масел на бетон</Data></Cell>
    <Cell ss:StyleID="s63"/>
    <Cell ss:StyleID="s62"/>
    <Cell ss:StyleID="s63"/>
    <Cell ss:StyleID="s42"/>
    <Cell ss:StyleID="s42"/>
    <Cell ss:StyleID="s42"/>
    <Cell ss:StyleID="s40"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>

```

```

<Cell><Data ss:Type="String">Продолжительность, лет</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s26"/>
<Cell ss:StyleID="s156"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s40"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s165"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s165"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
<Cell ss:Index="21" ss:StyleID="s150"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
</Row>

<Row>
<Cell ss:StyleID="s16"/>
<Cell ss:StyleID="s16"/>
<Cell ss:StyleID="s79"><Data ss:Type="String">x1322</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s65" ss:Formula="=R[-1]C+1"><Data ss:Type="Number">20</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s39"><Data ss:Type="String">Результат измерения прочности бетона</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s63"/>
<Cell ss:StyleID="s62"/>
<Cell ss:StyleID="s63"/>
<Cell ss:StyleID="s42"/>
<Cell ss:StyleID="s42"/>
<Cell ss:StyleID="s42"/>
<Cell ss:StyleID="s150"><Data ss:Type="Number">3</Data></Cell>
<Cell><Data ss:Type="String">Снижение: %</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s26"/>
<Cell ss:StyleID="s156"><Data ss:Type="Number">5</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s150"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s165"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s165"><Data ss:Type="Number">3</Data></Cell>
<Cell ss:Index="21" ss:StyleID="s150"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
</Row>
<Row>
<Cell ss:StyleID="s16"/>
<Cell ss:StyleID="s16"/>
<Cell ss:StyleID="s79"><Data ss:Type="String">x1331</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s65" ss:Formula="=R[-1]C+1"><Data ss:Type="Number">21</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s39"><Data ss:Type="String">Результат измерения глубины нейтрализации защитного
слоя бетона</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s63"/>
<Cell ss:StyleID="s62"/>
<Cell ss:StyleID="s63"/>
<Cell ss:StyleID="s42"/>
<Cell ss:StyleID="s42"/>
<Cell ss:StyleID="s42"/>
<Cell ss:StyleID="s150"><Data ss:Type="Number">3</Data></Cell>
<Cell><Data ss:Type="String">Снижение: %</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s26"/>
<Cell ss:StyleID="s156"><Data ss:Type="Number">10</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s150"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s165"><Data ss:Type="Number">5</Data></Cell>
<Cell ss:StyleID="s165"><Data ss:Type="Number">3</Data></Cell>
<Cell ss:Index="21" ss:StyleID="s150"><Data ss:Type="Number">0</Data></Cell>
</Row>

```

## Приложение Д

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018615097

Категория технического состояния изгибаемой  
железобетонной конструкции (КТС-ИЖБК)

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Пермский  
национальный исследовательский политехнический  
университет» (RU)*

Авторы: *Тонков Юрий Леонидович (RU),  
Кашеварова Галина Геннадьевна (RU)*



Заявка № 2018612205

Дата поступления 12 марта 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 24 апреля 2018 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



## Приложение Е

### Акт о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертационной работы



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«ПАШИЙСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКО-ЦЕМЕНТНЫЙ ЗАВОД»

ул. Свободы, д. 43, п.г.т. Пашия, Горнозаводский р-н, Пермский кр., Россия, 618824  
тел.: (34269) 3-95-00, тел./факс: (34269) 3-97-19,  
e-mail: pmcz@speccement.ru  
http: // www.speccement.ru  
ОКПО 00282205, ОГРН 1025902174385, ИНН/КПП 5934010175/593401001

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ОАО «ПМЦЗ»  
А.А. Каменских

«21» сентября 2017 г.



АКТ

О внедрении (использовании) результатов  
кандидатской диссертационной работы  
Тонкова Юрия Леонидовича

Комиссия от ОАО «Пашийский металлургическо-цементный завод» в составе:

Главный инженер,  
председатель комиссии - Гудков Е.С.,

Начальник ОКС - Старостин О.А.

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Тонкова Ю.Л., направленные на совершенствование методов и техники оценки технического состояния конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений за счет применения интеллектуальных систем, приняты к реализации в оценке технического состояния железобетонных конструкций объектов ОАО «ПМЦЗ». Использование основных результатов диссертационного исследования позволяет:

1. Повысить достоверность оценки технического состояния строительных конструкций;
2. Выявлять и контролировать причинно-следственную связь между признаками и категорией фактического технического состояния конструкций;
3. Сократить время на принятие решений в назначении категории технического состояния строительных конструкций в условиях многофакторности и неопределенности.
4. Обеспечить консультативную помощь при проверке результатов оценки технического состояния конструкций.

Председатель комиссии,  
главный инженер ОАО «ПМЦЗ»

Е.С. Гудков

Начальник ОКС ОАО «ПМЦЗ»

О.А. Старостин

## Приложение Ж

### Примеры численных значений контролируемых параметров, введенных в экспертную систему «КТС-ИЖБК» при апробации

Таблица Ж.1 – Численные значения контролируемых параметров, введенные в экспертную систему «КТС-ИЖБК» в процессе идентификации технического состояния балки Б7

| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$                             | Название<br>контролируемого<br>параметра                                 | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы) | Значение<br>$x_i$<br>на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменно<br>й $x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_b(x_i); \mu_{bc}(x_i); \mu_{bk}(x_i); \mu_n(x_i)\}$ |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Контролируемые параметры (18 шт.)<br>подсистемы «Состояние опор» ( $y_{sup}$ ) |                                                                          |                                                                                   |                                                                                               |                                                                                                                         |
| $1_{sup}$                                                                      | Результат проверки соответствия требованиям к конструктивному исполнению | Отклонения не обнаружены                                                          | <b>1</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |
| $2_{sup}$                                                                      | Результат проверки соответствия требований к материалам                  | Отклонения не обнаружены                                                          | <b>1</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |
| $11_{sup}$                                                                     | Результат оценки поврежденности                                          | Признаки перенапряжения не обнаружены                                             | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                            |
| $12_{sup}$                                                                     | Результат поверочных расчетов                                            | Прочность обеспечена. Перенапряжение – 0 %                                        | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                            |
| $111_{sup}$                                                                    | Результат измерения сопротивления арматуры                               | Снижение расчетного сопротивления арматуры не обнаружено – 0 %                    | <b>0</b> /<br>[0; 10]                                                                         | {1; –; –; 0}                                                                                                            |
| $1111_{sup}$                                                                   | Результат освидетельствования коррозии арматуры                          | Обнаружены участки сплошной поверхностной коррозии арматуры                       | <b>3</b> /<br>{1; 2; 3; 4; 5}                                                                 | {0,148; 0,781; 1; 0,8; 0,166}                                                                                           |

| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$ | Название<br>контролируемого<br>параметра                                                         | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы)                                      | Значение<br>$x_i$<br>на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменно<br>й $x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_b(x_i); \mu_{ж}(x_i); \mu_{к}(x_i); \mu_{н}(x_i)\}$ |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1112 <sup>sup</sup>                                | Результат<br>измерения<br>остаточной<br>площади сечения<br>арматуры                              | Площадь<br>сечения<br>арматуры<br>уменьшена в<br>результате<br>коррозии на 3 %                                         | <b>3</b> /<br>[0; 20]                                                                         | {0; 0,7; 0,3; 0}                                                                                                        |
| 121 <sup>sup</sup>                                 | Результат<br>измерения<br>механических<br>повреждений<br>бетона                                  | Площадь<br>сечения на опоре<br>не уменьшена –<br>0 %                                                                   | <b>0</b> /<br>[0; 30]                                                                         | {1; –; –; 0}                                                                                                            |
| 1211 <sup>sup</sup>                                | Результат<br>измерения<br>выщелачивания<br>известки из бетона                                    | Обнаружены<br>признаки<br>выщелачивания<br>бетона.<br>Выщелачивание<br>известки – 1 %                                  | <b>1</b> /<br>[0; 24]                                                                         | {0; 0,938; 0,0625; 0}                                                                                                   |
| 1212 <sup>sup</sup>                                | Результат<br>измерения<br>карбонизации<br>бетона                                                 | В продуктах<br>фильтрации<br>обнаружен<br>бикарбонат                                                                   | <b>1</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {0; –; –; 1}                                                                                                            |
| 12111 <sup>sup</sup>                               | Результат<br>определения<br>частоты<br>воздействия<br>промышленного<br>масла на бетон            | Следы<br>воздействия<br>масел и др.<br>нефтепродуктов<br>не обнаружены.<br>Количество<br>попаданий – 0<br>раз          | <b>0</b> /<br>[0; 6]                                                                          | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |
| 12112 <sup>sup</sup>                               | Результат<br>определения<br>продолжительност<br>и воздействия<br>промышленного<br>масла на бетон | Следы<br>воздействия<br>масел и др.<br>нефтепродуктов<br>не обнаружены.<br>Продолительно<br>сть воздействия<br>– 0 лет | <b>0</b> /<br>[0; 20]                                                                         | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |

| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$                                         | Название<br>контролируемого<br>параметра                                                       | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы)                                                              | Значение<br>$x_i$<br>на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменно<br>й $x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_v(x_i); \mu_{жс}(x_i); \mu_{жк}(x_i); \mu_n(x_i)\}$                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1221 <sup>sup</sup>                                                                        | Результат<br>освидетельствован<br>ия бетона                                                    | При<br>простукивании<br>бетона издается<br>довольно<br>звонкий звук,<br>остаются<br>малозаметные<br>сколы и штрихи<br>на поверхности<br>бетона | <b>2</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    | {0,836; 1; 0,190; 0}                                                                                                                                                                        |
| 1222 <sup>sup</sup>                                                                        | Результат<br>измерения<br>прочности бетона                                                     | Снижение<br>проектной<br>прочности бетона<br>не обнаружено.<br>Снижение<br>прочности – 0 %                                                     | <b>0</b> /<br>[0; 30]                                                                         | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                                                                |
| 1231 <sup>sup</sup>                                                                        | Результат<br>освидетельствован<br>ия поверхности<br>бетона (оценка<br>огневого<br>воздействия) | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены. Цвет<br>бетона<br>нормальный                                                             | <b>1</b> /<br>{1, 2, 3, 4, 5}                                                                 | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                                                                |
| 1232 <sup>sup</sup>                                                                        | Результат<br>измерения трещин<br>на поверхности<br>бетона (оценка<br>огневого<br>воздействия)  | Признаки<br>огневого<br>воздействий не<br>обнаружены.<br>Трещины не<br>обнаружены.<br>Ширина<br>раскрытия трещин<br>– 0 мм                     | <b>0</b> /<br>[0; 1]                                                                          | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                                                                |
| 12311 <sup>sup</sup>                                                                       | Результат<br>определения<br>максимальной<br>температуры<br>нагрева бетона                      | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены.                                                                                          | <b>60</b> /<br>[60; 500]                                                                      | Значения параметров<br>использованы в<br>определении значений<br>термов переменной<br>$y_{12311sup}$<br>(Контроль снижения<br>прочности бетона по<br>температуре нагрева) –<br>{1; 0; 0; 0} |
| 12312 <sup>sup</sup>                                                                       | Вид и условия<br>твердения                                                                     | Тяжелый бетон,<br>тепло-<br>влажностная<br>обработка                                                                                           | <b>1</b> /<br>{1, 2, 3}                                                                       |                                                                                                                                                                                             |
| Контролируемые параметры (29 шт.)<br>подсистемы «Состояние наклонных сечений» ( $y_{os}$ ) |                                                                                                |                                                                                                                                                |                                                                                               |                                                                                                                                                                                             |
| 1 <sub>os</sub>                                                                            | Результат проверки<br>соответствия<br>требованиям к<br>армированию                             | Отклонения не<br>обнаружены                                                                                                                    | <b>1</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                                                                |

| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$ | Название<br>контролируемого<br>параметра                                                                    | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы)                                            | Значение<br>$x_i$<br>на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменно<br>й $x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_b(x_i); \mu_{ж}(x_i); \mu_{к}(x_i); \mu_{н}(x_i)\}$                                    |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2os                                                | Результат проверки<br>соответствия<br>требований к<br>материалам                                            | Отклонения не<br>обнаружены                                                                                                  | <b>1</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                               |
| 11os                                               | Результат<br>поверочных<br>расчетов                                                                         | Прочность не<br>обеспечена.<br>Перенапряжение<br>– 4 %                                                                       | <b>4</b> /<br>[0; 30]                                                                         | [0; 0,6; 0,4; 0]                                                                                                                                           |
| 111os                                              | Результат оценки<br>поврежденности<br>бетона                                                                | Признаки<br>перенапряжения<br>не обнаружены                                                                                  | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                                                               |
| 112os                                              | Результат<br>измерения ширины<br>раскрытия<br>трещины на опоре                                              | Трещины на<br>опоре не<br>обнаружены.<br>Ширина<br>раскрытия<br>трещин – 0 мм                                                | <b>0</b> /<br>[0; 0,6]                                                                        | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                               |
| 1111os                                             | Результат<br>измерения ширины<br>раскрытия<br>наклонных трещин                                              | Наклонные<br>трещины<br>обнаружены.<br>Ширина<br>раскрытия<br>трещин – 0,1 мм                                                | <b>0,1</b> /<br>[0; 1]                                                                        | Значения параметров<br>использованы в<br>определении значений<br>термов переменной<br>$y_{111os}$<br>(Напряженное<br>состояние арматуры) –<br>{1; 0; 0; 0} |
| 1112os                                             | Результат<br>измерения<br>расстояния между<br>наклонными<br>трещинами (вдоль<br>поперечной<br>арматуры), мм | Наклонные<br>трещины<br>обнаружены.<br>Расстояние<br>между<br>трещинами<br>(длина стержня,<br>если трещина<br>одна) – 910 мм | <b>910</b>                                                                                    |                                                                                                                                                            |
| 1113os                                             | Класс рабочей<br>арматуры                                                                                   | Арматура класса<br>А-III                                                                                                     | <b>3</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    |                                                                                                                                                            |
| 1114os                                             | Результат<br>измерения угла<br>наклона трещины к<br>поперечной<br>арматуре                                  | Наклонные<br>трещины<br>обнаружены.<br>Угол наклона<br>трещин – 48 °                                                         | <b>48</b>                                                                                     |                                                                                                                                                            |



| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$ | Название<br>контролируемого<br>параметра                                                               | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы)                                | Значение<br>$x_i$<br>на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменно<br>й $x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_b(x_i); \mu_{ж}(x_i); \mu_{к}(x_i); \mu_{н}(x_i)\}$                           |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 121os                                              | Результат<br>измерения<br>сопротивления<br>арматуры                                                    | Снижение<br>расчетного<br>сопротивление<br>арматуры не<br>обнаружено.<br>Снижение<br>сопротивления –<br>0 %      | <b>0</b> /<br>[0; 10]                                                                         | {1; –; –; 0}                                                                                                                                      |
| 122os                                              | Результат<br>измерения<br>механических<br>повреждений<br>арматуры                                      | Механические<br>повреждения<br>арматуры не<br>обнаружены.<br>Снижение<br>восприятия<br>усилий<br>арматурой – 0 % | <b>0</b> /<br>[0; 20]                                                                         | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                      |
| 1211os                                             | Результат<br>освидетельствован<br>ия коррозии<br>арматуры                                              | Обнаружены<br>участки<br>сплошной<br>поверхностной<br>коррозии<br>поперечной<br>арматуры                         | <b>3</b> /<br>{1; 2; 3; 4; 5}                                                                 | {0,148; 0,781; 1; 0,8;<br>0,166}                                                                                                                  |
| 1212os                                             | Результат<br>измерения<br>остаточной<br>площади сечения<br>арматуры                                    | Площадь<br>сечения<br>арматуры в<br>результате<br>коррозии не<br>уменьшена – 0 %                                 | <b>0</b> /<br>[0; 20]                                                                         | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                      |
| 1221os                                             | Результат<br>освидетельствован<br>ия деформаций<br>арматуры (оценка<br>огневого<br>воздействия)        | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены.<br>Деформации<br>отсутствуют.                              | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                                                      |
| 12211os                                            | Результат<br>определения<br>максимальной<br>температуры<br>нагрева (оценка<br>огневого<br>воздействия) | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены.                                                            | <b>60</b> /<br>[60; 800]                                                                      | Значения параметров<br>использованы в<br>определении значений<br>термов переменной<br>$y_{1221os}$<br>(Контроль снижения<br>прочности арматуры по |

| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$ | Название<br>контролируемого<br>параметра                                                                        | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы)                                      | Значение<br>$x_i$<br>на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменно<br>й $x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_b(x_i); \mu_{ж}(x_i); \mu_{к}(x_i); \mu_{н}(x_i)\}$ |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12212os                                            | Класс арматуры,<br>предварительное<br>напряжение и<br>положение<br>арматуры (оценка<br>огневого<br>воздействия) | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены.<br>Ненапрягаемая<br>арматура.<br>Арматура класса<br>А-III (А400) | <b>1</b> /<br>{1; 2; 3}                                                                       | температуре нагрева) –<br>{1; 0; 0; 0}                                                                                  |
| 131os                                              | Результат<br>измерения<br>механических<br>повреждений<br>бетона                                                 | Механические<br>повреждения<br>бетона не<br>обнаружены.<br>Площадь<br>сечения не<br>уменьшена – 0 %                    | <b>0</b> /<br>[0; 30]                                                                         | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |
| 1311os                                             | Результат<br>измерения<br>выщелачивания<br>известки из бетона                                                   | Обнаружены<br>признаки<br>выщелачивания.<br>Выщелачивание<br>известки из<br>бетона – 1 %                               | <b>1</b> /<br>[0; 24]                                                                         | {0,148; 0,781; 1; 0,8;<br>0,166}                                                                                        |
| 1312os                                             | Результат<br>измерения<br>карбонизации<br>бетона                                                                | В продуктах<br>фильтрации<br>обнаружен<br>бикарбонат                                                                   | <b>1</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {0; –; –; 1}                                                                                                            |
| 13111os                                            | Результат<br>определения<br>частоты<br>воздействия<br>промышленного<br>масла на бетон                           | Следы<br>воздействия<br>масел и др.<br>нефтепродуктов<br>не обнаружены.<br>Количество<br>попаданий – 0<br>раз/год      | <b>0</b> /<br>[0; 6]                                                                          | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |
| 13112os                                            | Результат<br>определения<br>продолжительност<br>и воздействия<br>промышленного<br>масла на бетон                | Следы<br>воздействия<br>масел и др.<br>нефтепродуктов<br>не обнаружены.<br>Продолительно<br>сть воздействия<br>– 0 лет | <b>0</b> /<br>[0; 20]                                                                         | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |

| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$ | Название<br>контролируемого<br>параметра                                                       | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы)                                                           | Значение<br>$x_i$<br>на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменно<br>й $x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_b(x_i); \mu_{ж}(x_i); \mu_{к}(x_i); \mu_{н}(x_i)\}$ |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1321os                                             | Результат<br>освидетельствован<br>ия бетона                                                    | При<br>простукивании<br>бетона издается<br>довольно звонкий<br>звук, на<br>поверхности<br>бетона остаются<br>малозаметные<br>сколы и штрихи | <b>2</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    | {0,836; 1; 0,190; 0}                                                                                                    |
| 1322os                                             | Результат<br>измерения<br>прочности бетона                                                     | Снижение<br>проектной<br>прочности бетона<br>не обнаружено.<br>Снижение<br>прочности – 0 %                                                  | <b>0</b> /<br>[0; 30]                                                                         | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |
| 1331os                                             | Результат<br>измерения глубины<br>нейтрализации<br>защитного слоя                              | Нейтрализация<br>защитного слоя<br>бетона – не более<br>35 %                                                                                | <b>35</b> /<br>[0; 125]                                                                       | {0; 0,5; 0,5; 0}                                                                                                        |
| 1332os                                             | Результат<br>измерения<br>повреждения<br>защитного слоя                                        | Повреждения<br>защитного слоя<br>бетона<br>обнаружены.<br>Площадь<br>повреждения<br>защитного слоя<br>бетона – 14 %                         | <b>14</b> /<br>[0; 125]                                                                       | {0; 0; 0,125; 0,875}                                                                                                    |
| 1341os                                             | Результат<br>освидетельствован<br>ия поверхности<br>бетона (оценка<br>огневого<br>воздействия) | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены. Цвет<br>бетона<br>нормальный                                                          | <b>1</b> /<br>{1, 2, 3, 4, 5}                                                                 | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |
| 1342os                                             | Результат<br>измерения трещин<br>на поверхности<br>бетона (оценка<br>огневого<br>воздействия)  | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены.<br>Трещины<br>отсутствуют.<br>Ширина<br>раскрытия трещин<br>– 0 мм                    | <b>0</b> /<br>[0; 1]                                                                          | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |
| 13411os                                            | Результат<br>определения<br>максимальной<br>температуры<br>нагрева бетона                      | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены.                                                                                       | <b>60</b> /<br>[60; 500]                                                                      | Значения параметров<br>использованы в<br>определении значений<br>термов переменной<br>$y_{1341os}$                      |

| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$                                          | Название<br>контролируемого<br>параметра                                                                         | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы) | Значение<br>$x_i$<br>на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменно<br>й $x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_b(x_i); \mu_{ж}(x_i); \mu_{к}(x_i); \mu_{н}(x_i)\}$                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13412os                                                                                     | Вид и условия<br>твердения                                                                                       | Тяжелый бетон,<br>тепло влажностная<br>обработка                                  | <b>1</b> /<br>{1, 2, 3}                                                                       | (Контроль снижения<br>прочности бетона по<br>температуре нагрева) –<br>{1; 0; 0; 0}                                                                        |
| Контролируемые параметры (28 шт.)<br>подсистемы «Состояние нормальных сечений» ( $y_{os}$ ) |                                                                                                                  |                                                                                   |                                                                                               |                                                                                                                                                            |
| 1ns                                                                                         | Результат проверки<br>соответствия<br>требованиям к<br>армированию                                               | Отклонения не<br>обнаружены                                                       | <b>1</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                               |
| 2ns                                                                                         | Результат проверки<br>соответствия<br>требований к<br>материалам                                                 | Отклонения не<br>обнаружены                                                       | <b>1</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                               |
| 11ns                                                                                        | Результат<br>поверочных<br>расчетов                                                                              | Прочность<br>обеспечена.<br>Перенапряжение<br>– 0 %                               | <b>0</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                               |
| 111ns                                                                                       | Результат оценки<br>поврежденности<br>бетона                                                                     | Признаки<br>перенапряжения<br>бетона не<br>обнаружены                             | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                                                               |
| 1111ns                                                                                      | Результат измерения<br>ширины раскрытия<br>нормальных трещин                                                     | Нормальные<br>трещины не<br>обнаружены.<br>Ширина<br>раскрытия<br>трещин – 0 мм   | <b>0</b> /<br>[0; 1]                                                                          | Значения параметров<br>использованы в<br>определении значений<br>термов переменной<br>$y_{111ns}$<br>(напряженное<br>состояние арматуры) –<br>{1; 0; 0; 0} |
| 1112ns                                                                                      | Результат измерения<br>расстояния между<br>нормальными<br>трещинами (вдоль<br>поперечной<br>арматуры)            | Нормальные<br>трещины<br>обнаружены.<br>Расстояние между<br>трещинами – 0 мм      | <b>0</b>                                                                                      |                                                                                                                                                            |
| 1113ns                                                                                      | Класс рабочей<br>арматуры                                                                                        | Арматура класса<br>А-IIIв                                                         | <b>0</b> /<br>{0; 1; ...12}                                                                   |                                                                                                                                                            |
| 1114ns                                                                                      | Предельно-<br>допустимая<br>ширина трещины<br>из условия<br>сохранности<br>арматуры на<br>момент<br>обследования | Допустимая<br>ширина<br>раскрытия<br>трещин – 0,3 мм                              | <b>0,3</b> /<br>[0; 0,4]                                                                      | То же                                                                                                                                                      |

| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$ | Название<br>контролируемого<br>параметра                                                                        | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы)                                      | Значение<br>$x_i$<br>на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменно<br>й $x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_b(x_i); \mu_{ж}(x_i); \mu_{к}(x_i); \mu_{н}(x_i)\}$                                                                     |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 121 $ns$                                           | Результат<br>измерения<br>сопротивления<br>арматуры                                                             | Снижение<br>расчетного<br>сопротивления<br>арматуры не<br>обнаружено – 0<br>%                                          | <b>0</b> /<br>[0; 10]                                                                         | {1; –; –; 0}                                                                                                                                                                                |
| 122 $ns$                                           | Результат<br>измерения<br>механических<br>повреждений<br>арматуры                                               | Механические<br>повреждения<br>отсутствуют.<br>Снижение<br>восприятия<br>усилий<br>арматурой – 0 %                     | <b>0</b> /<br>[0; 20]                                                                         | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                                                                |
| 1211 $ns$                                          | Результат<br>освидетельствован<br>ия коррозии<br>арматуры                                                       | Поверхность<br>арматуры без<br>повреждения<br>коррозией                                                                | <b>1</b> /<br>{1; 2; 3; 4; 5}                                                                 | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                                                                |
| 1212 $ns$                                          | Результат<br>измерения<br>остаточной<br>площади сечения<br>арматуры                                             | Площадь<br>сечения<br>арматуры не<br>уменьшена – 0 %                                                                   | <b>0</b> /<br>[0; 20]                                                                         | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                                                                |
| 1221 $ns$                                          | Результат<br>освидетельствован<br>ия деформаций<br>арматуры (оценка<br>огневого<br>воздействия)                 | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены.<br>Деформации<br>отсутствуют.                                    | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                                                                                                |
| 12211 $ns$                                         | Результат<br>определения<br>максимальной<br>температуры<br>нагрева (оценка<br>огневого<br>воздействия)          | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены.                                                                  | <b>60</b> /<br>[60; 600]                                                                      | Значения параметров<br>использованы в<br>определении значений<br>термов переменной<br>$y_{1221ns}$<br>(Контроль снижения<br>прочности арматуры по<br>температуре нагрева) –<br>{1; 0; 0; 0} |
| 12212 $ns$                                         | Класс арматуры,<br>предварительное<br>напряжение и<br>положение<br>арматуры (оценка<br>огневого<br>воздействия) | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены.<br>Ненапрягаемая<br>арматура.<br>Арматура класса<br>А-III (A400) | <b>1</b> /<br>{1; 2; 3}                                                                       |                                                                                                                                                                                             |

| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$ | Название<br>контролируемого<br>параметра                                                         | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы)                                                           | Значение<br>$x_i$<br>на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменно<br>й $x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_b(x_i); \mu_{ж}(x_i); \mu_{к}(x_i); \mu_{н}(x_i)\}$ |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 131 $ns$                                           | Результат<br>измерения<br>механических<br>повреждений<br>бетона                                  | Механические<br>повреждения<br>бетона<br>обнаружены.<br>Площадь<br>сечения<br>уменьшена – 3 %                                               | <b>3</b> /<br>[0; 30]                                                                         | {0; 0,85; 0,15; 0}                                                                                                      |
| 1311 $ns$                                          | Результат<br>измерения<br>выщелачивания<br>известки из бетона                                    | Признаки<br>выщелачивания<br>не обнаружены.<br>Выщелачивание<br>известки из<br>бетона – 0 %                                                 | <b>0</b> /<br>[0; 24]                                                                         | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |
| 1312 $ns$                                          | Результат<br>измерения<br>карбонизации<br>бетона                                                 | В продуктах<br>фильтрации<br>бикарбонат не<br>обнаружен                                                                                     | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                            |
| 13111 $ns$                                         | Результат<br>определения<br>частоты<br>воздействия<br>промышленного<br>масла на бетон            | Следы<br>воздействия<br>масел и др.<br>нефтепродуктов<br>не обнаружены.<br>Количество<br>попаданий – 0<br>раз/год                           | <b>0</b> /<br>[0; 6]                                                                          | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |
| 13112 $ns$                                         | Результат<br>определения<br>продолжительност<br>и воздействия<br>промышленного<br>масла на бетон | Следы<br>воздействия<br>масел и др.<br>нефтепродуктов<br>не обнаружены.<br>Продолительно<br>сть воздействия<br>– 0 лет                      | <b>0</b> /<br>[0; 20]                                                                         | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |
| 1321 $ns$                                          | Результат<br>освидетельствован<br>ия бетона                                                      | При<br>простукивании<br>бетона издается<br>довольно звонкий<br>звук, на<br>поверхности<br>бетона остаются<br>малозаметные<br>сколы и штрихи | <b>2</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    | {0,836; 1; 0,190; 0}                                                                                                    |
| 1322 $ns$                                          | Результат<br>измерения<br>прочности бетона                                                       | Снижение<br>проектной<br>прочности бетона                                                                                                   | <b>0</b> /<br>[0; 30]                                                                         | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |

| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$                                                   | Название<br>контролируемого<br>параметра                                                       | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы)                                       | Значение<br>$x_i$<br>на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменно<br>й $x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_{\text{в}}(x_i); \mu_{\text{ж}}(x_i); \mu_{\text{к}}(x_i); \mu_{\text{н}}(x_i)\}$                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                      |                                                                                                | не обнаружено.<br>Снижение<br>прочности бетона<br>– 0 %                                                                 |                                                                                               |                                                                                                                                                                                           |
| 1331 $ns$                                                                                            | Результат<br>измерения глубины<br>нейтрализации<br>защитного слоя                              | Нейтрализация<br>защитного слоя<br>бетона – 5 %                                                                         | <b>5</b> /<br>[0; 125]                                                                        | {0; 0,95; 0,05; 0}                                                                                                                                                                        |
| 1332 $ns$                                                                                            | Результат<br>измерения<br>повреждения<br>защитного слоя                                        | Площадь<br>повреждения<br>защитного слоя<br>бетона                                                                      | <b>0</b> /<br>[0; 125]                                                                        | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                                                              |
| 1341 $ns$                                                                                            | Результат<br>освидетельствован<br>ия поверхности<br>бетона (оценка<br>огневого<br>воздействия) | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены. Цвет<br>бетона<br>нормальный                                      | <b>1</b> /<br>{1, 2, 3, 4, 5}                                                                 | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                                                              |
| 1342 $ns$                                                                                            | Результат<br>измерения трещин<br>на поверхности<br>бетона (оценка<br>огневого<br>воздействия)  | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены.<br>Трещин<br>отсутствуют.<br>Ширина<br>раскрытия трещин<br>– 0 мм | <b>0</b> /<br>[0; 1]                                                                          | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                                                              |
| 13411 $ns$                                                                                           | Результат<br>определения<br>максимальной<br>температуры<br>нагрева бетона                      | Признаки огневых<br>воздействий не<br>обнаружены.                                                                       | <b>60</b> /<br>[60; 500]                                                                      | Значения параметров<br>использованы в<br>определении значений<br>термов переменной<br>$y_{1341ns}$<br>(Контроль снижения<br>прочности бетона по<br>температуре нагрева) –<br>{1; 0; 0; 0} |
| 13412 $ns$                                                                                           | Вид и условия<br>твердения                                                                     | Тяжелый бетон,<br>тепло<br>влажностная<br>обработка                                                                     | <b>1</b> /<br>{1, 2, 3}                                                                       |                                                                                                                                                                                           |
| Контролируемые параметры (11 шт.)<br>подсистемы «Состояние закладных деталей и связей» ( $y_{con}$ ) |                                                                                                |                                                                                                                         |                                                                                               |                                                                                                                                                                                           |
| 1 $con$                                                                                              | Результат проверки<br>соответствия<br>требованиям к<br>конструктивному<br>исполнению           | Отклонения не<br>обнаружены                                                                                             | <b>1</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                                                              |

| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$ | Название<br>контролируемого<br>параметра                                                      | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы)      | Значение<br>$x_i$<br>на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменно<br>й $x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_b(x_i); \mu_{ж}(x_i); \mu_{к}(x_i); \mu_{н}(x_i)\}$ |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $2_{con}$                                          | Результат проверки<br>соответствия<br>требований к<br>материалам                              | Отклонения не<br>обнаружены                                                            | <b>1</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    | {1; 0; 0; 0}                                                                                                            |
| $11_{con}$                                         | Результат оценки<br>поврежденности<br>детали                                                  | Признаки<br>перенапряжения<br>детали не<br>обнаружены                                  | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                            |
| $12_{con}$                                         | Результат оценки<br>поврежденности<br>бетона в<br>сопряжении                                  | Признаки<br>перенапряжения<br>бетона не<br>обнаружены                                  | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                            |
| $1211_{con}$                                       | Результат<br>освидетельст<br>вования коррозии<br>детали                                       | Обнаружены<br>участки<br>сплошной<br>поверхностной<br>коррозии детали                  | <b>3</b> /<br>{1; 2; 3; 4; 5}                                                                 | {0,148; 0,781; 1; 0,8;<br>0,166}                                                                                        |
| $1212_{con}$                                       | Результат<br>измерения<br>остаточной<br>площади сечения<br>детали                             | Площадь сечения<br>детали<br>уменьшена на<br>2 %                                       | <b>2</b> /<br>[0; 20]                                                                         | {0; 0,8; 0,2; 0}                                                                                                        |
| $111_{con}$                                        | Результат<br>измерения<br>сопротивления<br>материала                                          | Снижение<br>расчетного<br>сопротивление<br>материала (стали)<br>не обнаружено –<br>0 % | <b>0</b> /<br>[0; 10]                                                                         | {1; –; –; 0}                                                                                                            |
| $112_{con}$                                        | Результат<br>измерения<br>механических<br>повреждений<br>детали                               | Механические<br>повреждения не<br>обнаружены                                           | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                            |
| $1121_{con}$                                       | Результат<br>освидетельствован<br>ия деформаций<br>детали (оценка<br>огневого<br>воздействия) | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены.<br>Деформаций<br>отсутствуют     | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                            |



| Обозначение<br>(индекс $i$ )<br>параметра<br>$x_i$                               | Название<br>контролируемого<br>параметра                                                               | Описание<br>значения<br>параметра<br>(ответ<br>пользователя на<br>вопрос системы)                                                                                                         | Значение<br>$x_i$<br>на входе<br>в систему /<br>множество<br>значений<br>переменно<br>й $x_i$ | Значения функций<br>принадлежности<br>на входе в систему,<br>$\{\mu_v(x_i); \mu_{ж}(x_i); \mu_{к}(x_i); \mu_n(x_i)\}$                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11211 $con$                                                                      | Результат<br>определения<br>максимальной<br>температуры<br>нагрева (оценка<br>огневого<br>воздействия) | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены.                                                                                                                                     | <b>60</b> /<br>[60; 600]                                                                      | Значения параметров<br>использованы в<br>определении значений<br>термов переменной<br>$y_{1121con}$<br>(Контроль снижения<br>прочности детали по<br>температуре нагрева) –<br>{1; 0; 0; 0} |
| 11212 $con$                                                                      | Материал (сталь)<br>детали                                                                             | Признаки<br>огневого<br>воздействия не<br>обнаружены.                                                                                                                                     | <b>1</b> /<br>{1; 2; 3}                                                                       |                                                                                                                                                                                            |
| Контролируемые параметры (4 шт.)<br>подсистемы «Контроль жесткости» ( $y_{df}$ ) |                                                                                                        |                                                                                                                                                                                           |                                                                                               |                                                                                                                                                                                            |
| 1 $df$                                                                           | Результат проверки<br>соответствия<br>требованиям к<br>прогибу                                         | Отклонения не<br>обнаружены                                                                                                                                                               | <b>1</b> /<br>{1; 2; 3; 4}                                                                    | {1; 0; 0; 0}                                                                                                                                                                               |
| 11 $df$                                                                          | Результат<br>поверочных<br>расчетов                                                                    | Жесткость по<br>результатам<br>поверочных<br>расчетов<br>обеспечена.                                                                                                                      | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                                                                                               |
| 121 $df$                                                                         | Результат<br>освидетельствован<br>ия прогиба                                                           | Признаки<br>ненормативного<br>прогиба не<br>обнаружены.<br>Отличительные<br>особенности<br>прогиба<br>конструкции в<br>сравнении с<br>прогибами<br>смежных<br>конструкций<br>отсутствуют. | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                                                                                               |
| 122 $df$                                                                         | Результат<br>измерения прогиба                                                                         | Измеренное<br>значение<br>прогиба меньше<br>значений,<br>соответствующи<br>х<br>перенапряжению<br>(перегрузке)<br>конструкции                                                             | <b>0</b> /<br>{0; 1}                                                                          | {1; –; –; 0}                                                                                                                                                                               |

## Приложение 3

## Схемы расположения контролируемых параметров балок Б6, Б7, Б12

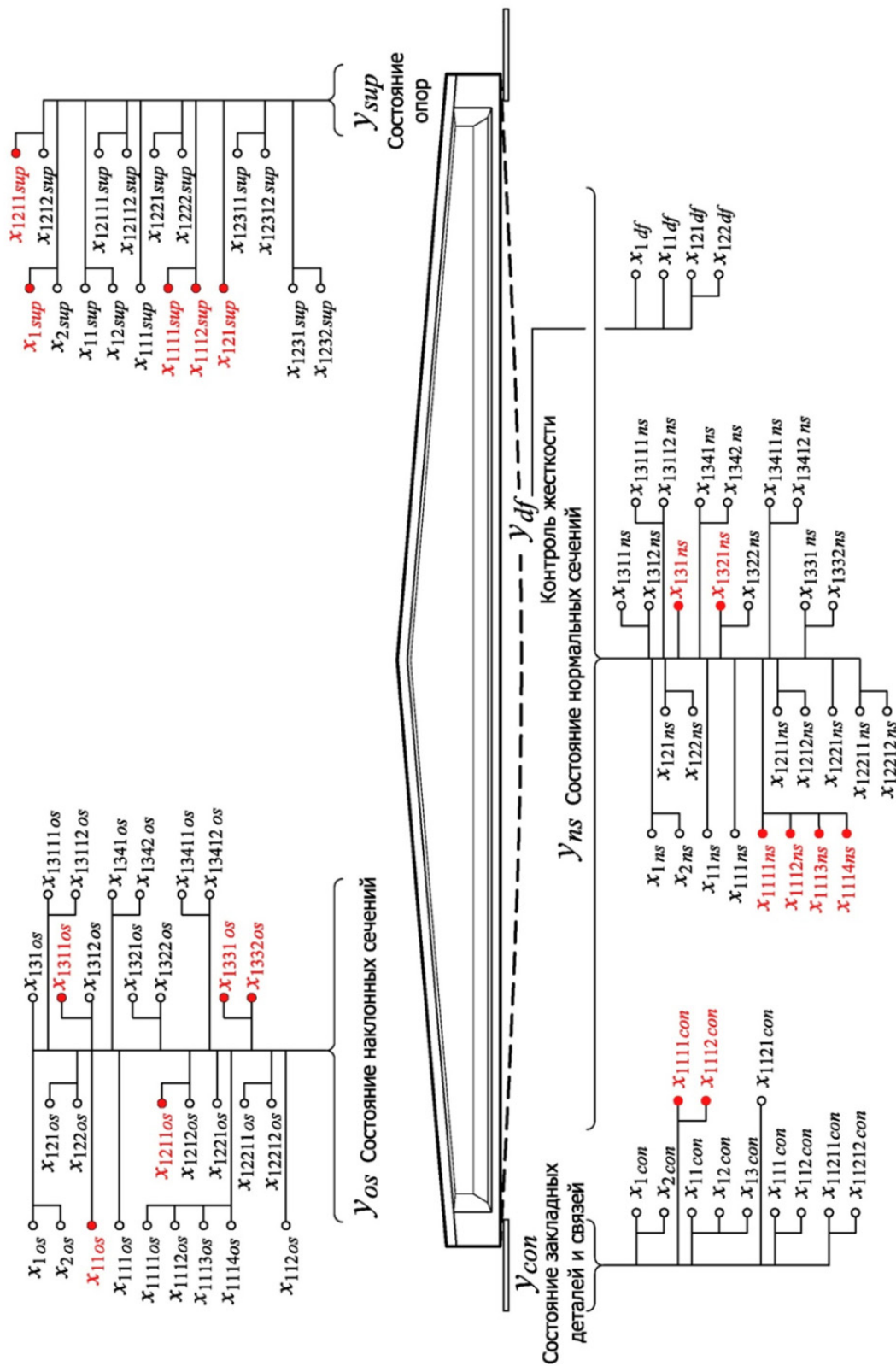


Рисунок 3.1 – Условная схема расположения контролируемых параметров технического состояния балки Б6: отмечены (закрашены) параметры, учитывающие обнаруженные аномалии

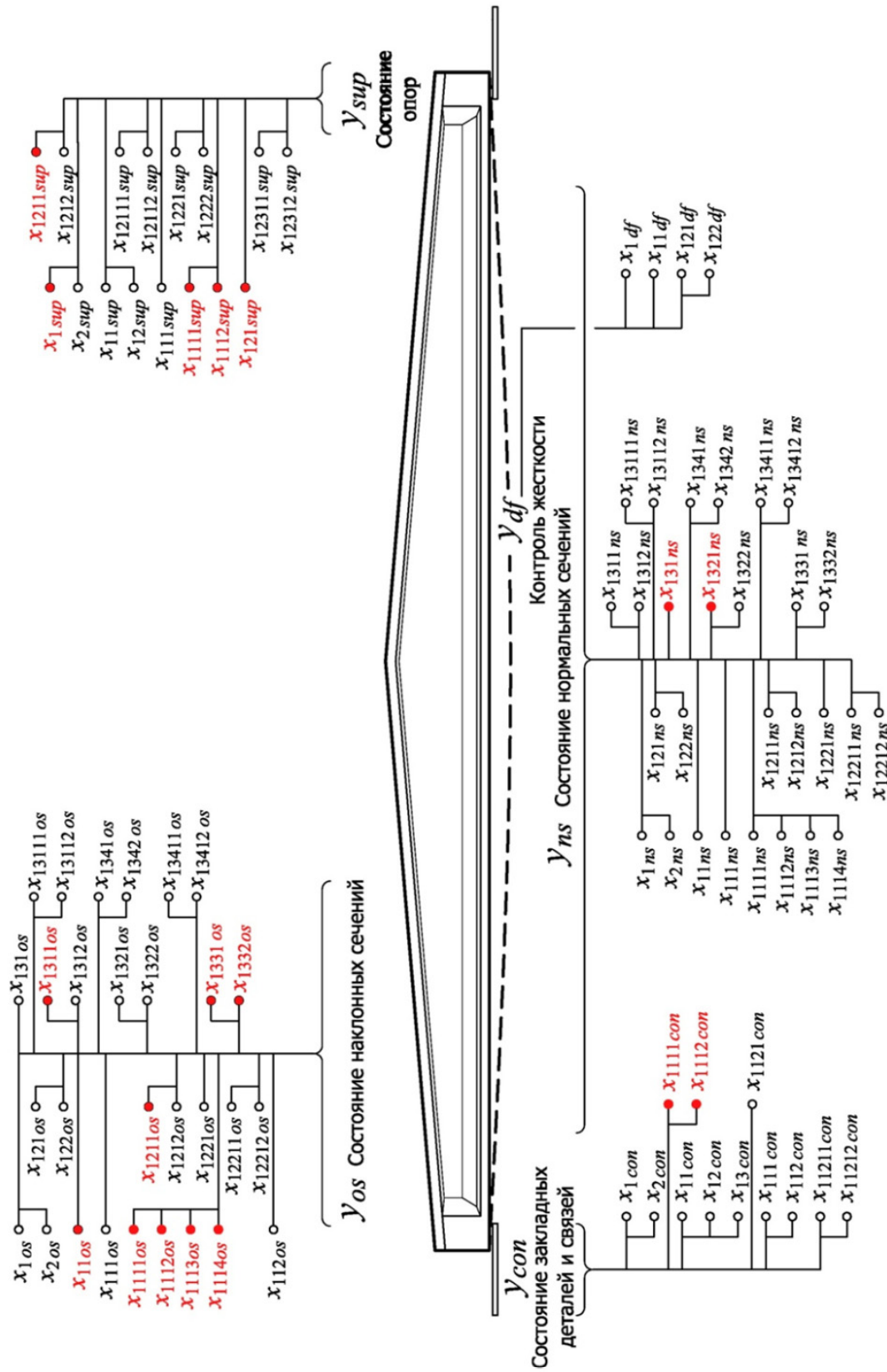


Рисунок 3.2 – Условная схема расположения контролируемых параметров технического состояния балки Б7: отмечены (закрашены) параметры, учитывающие обнаруженные аномалии

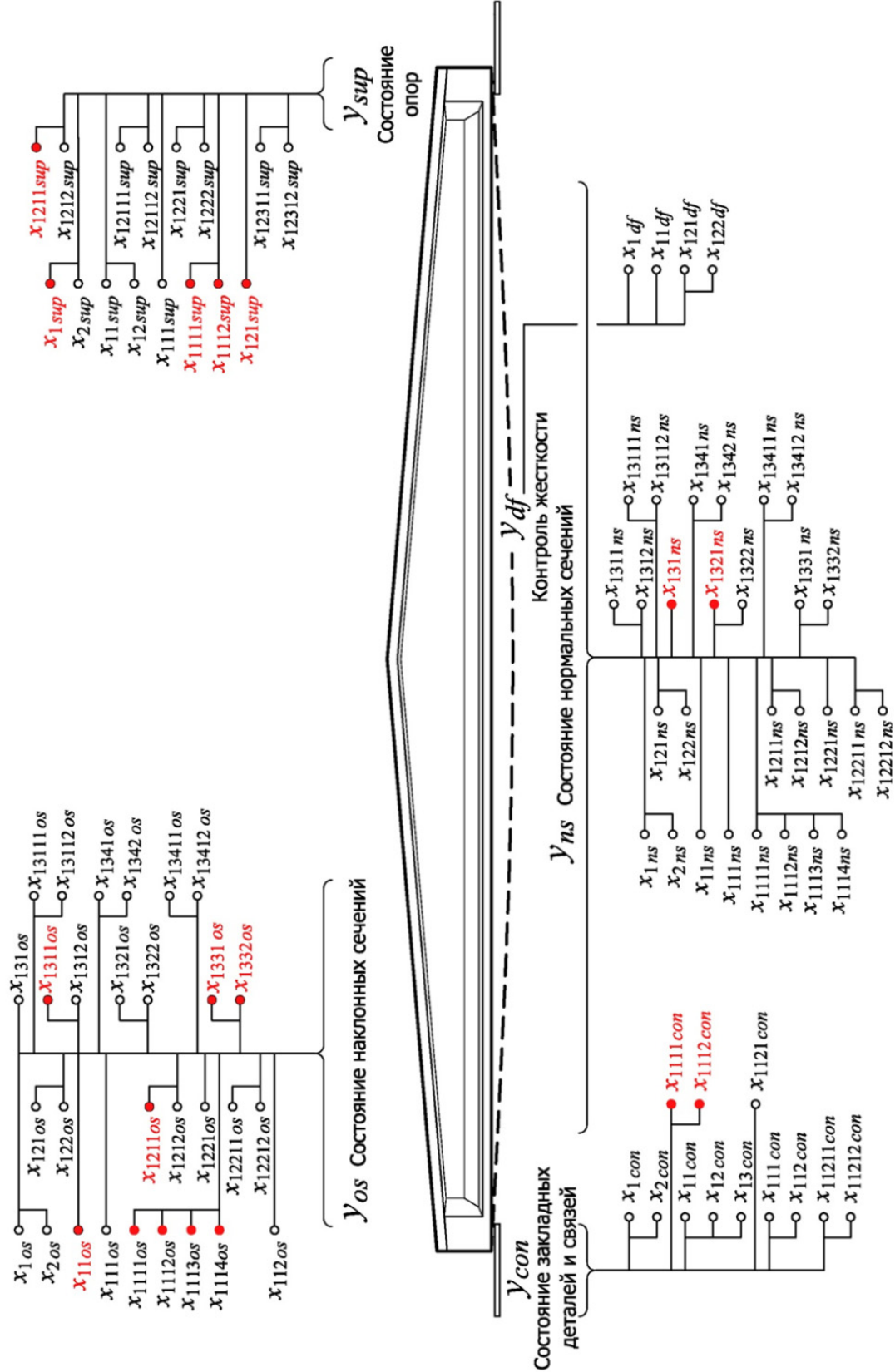


Рисунок 3.3 – Условная схема расположения контролируемых параметров технического состояния балки Б12: отмечены (закрашены) параметры, учитывающие обнаруженные аномалии