

На правах рукописи

СОКОЛОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ

**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
И НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ЗДАНИЙ СТАРОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ**

Специальность: **05.23.01** – Строительные конструкции,
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор
Шульман Сергей Георгиевич

Официальные оппоненты:

Лабудин Борис Васильевич
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», (г. Архангельск), кафедра инженерных конструкций и архитектуры, профессор;

Орлович Ромуальд Болеславович
доктор технических наук, профессор, «Западно-Померанский технологический университет», (г. Щецин, Польша), кафедра общего строительства, заведующий;

Савин Сергей Николаевич
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФБГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра техносферной безопасности, профессор

Ведущая организация:

ОАО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений», (г. Москва)

Защита диссертации состоится «28» апреля 2016 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.03** при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Кондратьева Лидия Никитовна

І ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. В настоящее время во многих городах России возникает настоятельная необходимость определения инженерно-технической целесообразности реконструкции зданий старой городской застройки с наибольшим учетом при этом местных условий и конструктивно-планировочных особенностей старого фонда вообще. Это, в свою очередь, требует проведения детального анализа технического состояния и надежности строительных конструкций старых зданий, а также приведения в единый согласованный вид имеющейся для организации и выполнения этой деятельности нормативной литературы.

В данной работе для проведения такого анализа предлагается использовать существующий математический аппарат в известной области знаний, называемой «техническая диагностика». Применение этого аппарата при диагностировании состояний строительных конструкций ранее не отмечено.

Для того чтобы поставить профессиональный диагноз, т. е. обеспечить все требования процедуры технической диагностики, следует с высокой степенью достоверности распознать техническое состояние исследуемого объекта, т. е. выполнить не менее важное и профессиональное техническое обследование его состояний.

Для диагностирования состояний здания в целом, как сложной многоэлементной строительной системы, нужны многоуровневые модели принятия решений о распознавании диагнозов отдельных конструктивных элементов, групп элементов и подсистем всех уровней этой системы. В связи с этим важна разработка методологии построения многоуровневой, иерархической структуры диагностики состояний конструкций, которая позволит оценивать не только техническое состояние, но и надежность, и физический износ всех структур 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 необходимых для уровня анализа вероятностных параметров состояний конструктивных элементов, групп элементов, подсистем и системы высшего уровня иерархии – здания в целом.

Таким образом, актуальность настоящей работы определяется необходимостью решения важной проблемы сохранения зданий старой городской застройки, а так же разночтениями в имеющейся литературе по оценке их технического состояния, в том числе нормативной. Научно обоснованное присвоение категории технического состояния конструкциям зданий старой городской застройки, определение их надежности и степени физического износа позволяют вовремя и достоверно распознать состояние строительной системы, вовремя и эффективно в нее «вмешаться» без прекращения эксплуатации и обоснованно определить степень и затраты этого инженерного вмешательства. Такой подход представляется как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение в области создания моделей принятия решений о состояниях строительных конструкций, об их надежности и физическом износе, а также в

области разработки для этого научно обоснованной нормативной базы, что в итоге имеет важное и социально-экономическое значение.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам обследований и испытаний строительных конструкций зданий и сооружений для оценки их технического состояния посвящено очень большое количество работ. Так, в учебных материалах, монографиях и статьях А.И. Бедова, М.Д. Бойко, А.А. Веселова, В.Т. Гроздова, А.Н. Добромыслова, А.А. Землянского, В.М. Калинина, О.В. Лужина, Р.Б. Орловича, Г.Т. Попова, Н.В. Прядко, В.В. Ремнева, В.И. Римшина, В.Ф. Сапрыкина, и др. отмечается, что это весьма специфичный вид не только инженерной, но и научной деятельности. Часть этой деятельности, связанная с испытаниями материалов и конструкций имеет глубокие исторические корни. В этой области работали многие известные ученые и инженеры. Труды Н.А. Белелюбского, Н.С. Стрелецкого заложили основы ведения работ по испытаниям конструкций. Значительный вклад в развитие методов и средств обследования строительных конструкций зданий внесли Н.Н. Аистов, Р.И. Аронов, К.И. Безухов, В.В. Белов, Г.И. Белый, А.Г. Григоренко, К.А. Гтуховский, Д.Е. Долидзе, Ю.Д. Золотухин, И.Л. Корчинский, Л.И. Кривилева, Н.А. Крылова, Б.В. Лабудин, А.Н. Мамин, М.А. Новгородский, Г.Я. Почтовик, С.Н. Савин, В.М. Сердюкова, Г.Л. Хесин, А.И. Яковлев, и др.

До настоящего времени не имеет строгой классификации анализ последствий аварий и катастроф. Тем не менее, в работах Б.И. Беляева, В.З. Власова, Ф.Д. Дмитриева, В.Г. Золотухина, В.И. Каракозовой, В.С. Корниенко, М.Н. Лащенко, Б.В. Остроумова, К.М. Сахновского, Б.В. Сендерова, А.М. Титова, А.Н. Шкинева, Ф.С. Ясинского и др. выполнены обобщение, анализ аварий, теоретические исследования и разработка практических рекомендаций по их предотвращению. В последние годы эти работы продолжаются, их результаты постоянно публикуются в сборниках статей «Предотвращение аварий зданий и сооружений», ежегодно выходящих под редакцией профессора К.И. Еремина.

В области диагностирования технического состояния строительных объектов высокой оценки в настоящее время заслуживают работы, которые основаны на анализе риска аварий (А.П. Мельчаков, А.Г. Тамразян) и теории нечеткой логики (В.С. Уткин, С.Д. Штовба).

В данной работе, как отмечено выше, для решения задач по определению достоверной картины технического состояния, надежности и износа конструктивных элементов и здания в целом, а также для приведения в современный и согласованный вид нормативной литературы, существующей в обследовательской деятельности, впервые предлагается использовать математический аппарат технической диагностики, основанный на вероятностно-статистических методах с включением в процедуру диагностирования элементов теории информации.

В диссертации одним из основных статистических методов технической диагностики принят метод Байеса, процедура применения которого для сложных технических систем разработана в трудах И.А. Биргера, А. Зельнера.

В своих работах И.А. Биргер совершенно справедливо отмечает, что конечной целью технической диагностики является повышение надежности и ре-

сурса систем и что техническую диагностику вообще следует рассматривать как один из основных разделов общей теории надежности. Таким образом, техническое состояние и его главный признак – надежность, надежность и ее важный раздел – техническая диагностика, техническая диагностика и обследование технического состояния, все это следует считать звеньями одного процесса, обеспечивающего создание и поддержание нормальных условий функционирования старых зданий на современном уровне. Звенья этой «цепи» должны быть неразрывны, должны рассматриваться вместе, в совокупности и взаимосвязи.

Проблемы надежности строительных конструкций на основе вероятностных подходов рассмотрены в работах многих ученых, среди которых можно отметить труды В.В. Болотина, С.Л. Буторина, Б.А. Гарагаша, А.П. Кудзиса, О.В. Лужина, В.Д. Райзера, А.Р. Ржаницына, А.Г. Ройтмана, Н.Н. Складнева, Б.И. Снаркиса, С.А. Тимашева, В.С. Уткина, С.Г. Шульмана, Г.С.Шульмана и других авторов. Значительная роль в развитии теории надежности принадлежит также и зарубежным ученым: Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати, А.М. Фрейденталь, Г. Шпете и др.

В настоящей работе представлен достаточно подробный материал по применению вероятностно-статистического подхода при распознавании технического состояния строительных систем и их элементов в рамках математических методов технической диагностики, а также материал по оценке параметров их надежности на этой же основе.

Цель исследования – построение научно обоснованной методологии диагностики технического состояния, оценки надежности и степени физического износа для зданий старой городской застройки с использованием математического аппарата и вероятностно-статистических методов технической диагностики и методов теории информации.

Задачи исследования:

- разработать методики вероятностно-статистического аппарата технической диагностики на основе процедуры Байеса и элементов теории информации; сформулировать понятия «состояние» и «диагностические признаки» для конструкций рассматриваемых зданий в рамках разработанных методик; обосновать диагностирование конструкций на основе пяти состояний;

- выполнить ретроспективный анализ результатов обследований прошлых лет, сбор, обработку и обобщение информации по состояниям (диагнозам) и характерным повреждениям (диагностическим признакам), упорядочить статистические данные и составить диагностические матрицы для строительных конструкций старых зданий;

- разработать конкретные предложения и мероприятия по приведению конструкций в исправное состояние в зависимости от присвоенной категории;

- выполнить анализ полноты, устойчивости и информативности диагностических матриц при использовании различных методов (аппроксимации дискретных распределений априорных вероятностей состояний непрерывными функциями; с позиций таких понятий теории информации, как диагностический вес и диагностическая ценность признаков; на основе методов теории нечеткой

логики для диагностирования пяти состояний; с использованием методик интервального подхода);

- определить вероятностное представление порогового значения при назначении той или иной категории технического состояния для конструкций здания на всех уровнях диагностирования;

- ввести необходимые положения теории информации, основным из которых является понятие энтропии системы, сформулировать понятие «информационный вклад» состояний при прохождении по уровням иерархии;

- разработать методологию построения многоуровневой структуры диагностики, позволяющую оценивать не только состояние, но и надежность, а также физический износ всех структур всех уровней;

- построить графическую иерархическую модель диагностирования в виде «диагностического дерева» и оценить прохождение по иерархии в прямом и обратном направлениях;

- разработать алгоритм и программу для выполнения расчетов и для реализации на их основе численных примеров.

Объект исследования – здания старой городской застройки.

Предмет исследования:

- техническое состояние, надежность и физический износ строительных конструкций зданий старой городской застройки, определяемые на основе вероятностно-статистических методов и многоуровневых моделей принятия решений об их состояниях.

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Сформулирована концепция, которая состоит в том, что разработаны методики и алгоритмы диагностирования технического состояния конструкций зданий старой городской застройки с использованием математического аппарата технической диагностики, основанного на вероятностно-статистических методах распознавания состояний и методах теории информации; предлагаемый подход для строительных конструкций применен впервые.

2. Для основных конструкций рассматриваемых зданий построены специальные вероятностные таблицы – диагностические матрицы; для этого собран значительный материал по статистике состояний (диагнозов) и характерных повреждений (диагностических признаков) конструкций, который в данной работе упорядочен и уложен в рамки имеющихся, разработанных методик теоретического аппарата технической диагностики и теории информации.

3. Доказаны полнота, информативность и устойчивость диагностических матриц для характерных конструктивных элементов зданий с использованием различных методов: методов теории информации (анализ диагностических веса и ценности обследования), методов аппроксимации дискретных вероятностных статистических распределений непрерывными функциями, методами теории интервальных оценок и методами теории нечетких множеств; указанные методы для диагностирования конструкций рассматриваемых зданий на основе рассмотрения пяти состояний применены впервые.

4. С использованием статистических методов технической диагностики и результатов проведенного численного эксперимента для конструкций рассматриваемых зданий получен минимально приемлемый пороговый уровень диагностирования, позволяющий несколько видоизменить традиционное в технической диагностике решающее правило о назначении диагнозов элементам технических систем.

5. С использованием методов теории информации для объектов исследования сформулированы понятия максимальная энтропия (абсолютная и с учетом априорной статистики), остаточная энтропия (степень определенности или количество внесенной информации) и вероятность степени определенности, позволившие поставить и решить задачу о построении процедуры принятия решений о состояниях здания, как многоэлементной технической системы.

6. Для разработки моделей принятия решений о состояниях здания в целом создана методология построения многоуровневой, иерархической структуры диагностики, которая позволяет оценивать состояние конструкций здания как структур иерархии на каждом уровне; построена графическая модель диагностирования в виде «диагностического дерева».

7. Разработан программный продукт «ВАТС», который реализует расчеты необходимых вероятностных параметров на каждом уровне на основе уровневой постановки задачи и который вполне может рассматриваться как элемент интеллектуального экспертно-вычислительного комплекса (ИЭВК); с использованием «ВАТС» выполнены расчеты и приведены их примеры для анализа диагнозов конструктивных элементов здания в рамках прямого хода диагностирования, т. е. снизу вверх по «диагностическому дереву».

8. Предложена основанная на статистике диагнозов методика расчета надежности элементов и здания в целом, в которой рассчитанная на каждом иерархическом уровне вероятность аварийного состояния трактуется как отказ конструктивного элемента, группы элементов, подсистем и системы в целом; таким образом, прохождение по «диагностическому дереву» в прямом направлении для каждого элемента каждого уровня дает вероятность безотказной работы (безотказность), как численную меру надежности.

9. Предложенная вероятностная модель и реализованный на ее основе прямой ход диагностирования позволяют построить методику расчета физического износа на основе вероятностного подхода; такой подход создает предпосылки аргументированного обоснования необходимости разработки новой методики расчета физического износа и новых норм.

10. Предложено рассмотреть обратный ход диагностирования (сверху вниз по «диагностическому дереву»), в рамках которого стало возможным выполнить процентное распределение долей информации о состояниях между всеми конструктивными элементами вероятностной иерархической структуры, что вполне может стать основой стоимостных расчетов, например, в методиках оценки недвижимости.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что доказана необходимость и возможность применения вероятностных методов распознавания состояний в рамках теоретического математического аппарата техниче-

ской диагностики, теории информации и теории надежности, т. е. необходимость и возможность формализации принятия решений о состояниях строительных конструкций. Предложенный теоретический аппарат имеет высокую значимость при научном обосновании необходимости совершенствования нормативной базы в рассматриваемой области инженерной деятельности.

Практическая значимость диссертационного исследования состоит в реализации предлагаемого подхода в практической обследовательской деятельности, что придаст уверенность эксперту при назначении категории технического состояния, позволит обоснованно определить комплекс мероприятий, также предложенный в данной работе в зависимости от присвоенной категории состояния, и эффективно планировать эксплуатационные расходы и затраты на приведение объекта в исправное состояние. Предложенная методология диагностирования может быть использована при создании современных нормативных документов по оценке состояний, надежности и физического износа рассматриваемых зданий на основе единого вероятностного подхода.

Методология и методы исследования. Состоят в использовании общенаучных методов исследования: статистических, теории вероятностей, теории информации, моделирования, формализации, анализа (в том числе ретроспективного) – при построении решения на уровне отдельных конструктивных элементов; основных принципов организации систем и системного анализа – при построении уровневой иерархической модели диагностирования в виде «диагностического дерева».

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование необходимости в новом подходе к оценке технического состояния, надежности и физического износа зданий старой городской застройки на основе использования аппарата технической диагностики;
- статистический материал по состояниям (диагнозам) и характерным повреждениям (диагностическим признакам) для основных конструкций, способы его упорядочения и представления в виде специальных вероятностных таблиц – диагностических матриц;
- анализ полноты, информативности и устойчивости диагностических матриц с использованием предложенных методов;
- обоснование минимально приемлемого порогового уровня диагностирования и скорректированная формулировка решающего правила о назначении диагнозов элементам технических систем;
- постановка и решение задачи о построении процедуры диагностирования состояний здания, как многоэлементной технической системы на основе методов теории информации;
- методология построения многоуровневой, иерархической структуры диагностики и пример построения графической модели диагностирования в виде «диагностического дерева» в рамках прямого хода диагностирования;
- программный продукт «ВАТС», реализующий расчеты вероятностных параметров на каждом уровне на основе уровневой постановки задачи;
- результаты обратного хода диагностирования и процентное распределение долей информации о состояниях между всеми элементами вероятностной

иерархической структуры для определения вклада состояний элементов в состояние системы в целом;

- методика определения надежности элементов и здания в целом на основе расчета вероятностных диагностических параметров при прохождении по «диагностическому дереву» в прямом направлении;

- методика расчета физического износа на основе предложенной вероятностной диагностической модели, позволяющая создать предпосылки для аргументированного обоснования необходимости разработки новых норм.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 05.23.01 – «Строительные конструкции, здания и сооружения», а именно п. 4 «Развитие методов оценки надежности строительных конструкций, зданий и сооружений, прогнозирование сроков их службы, безопасности при чрезвычайных ситуациях и запроектных воздействиях», п. 8 «Методы и техника оценки и диагностики технического состояния, усиление и восстановление конструкций и элементов эксплуатируемых зданий и сооружений, прогрессивные формы обслуживания зданий, сооружений и систем их жизнеобеспечения».

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности определяется:

- достоверностью и представительностью собранных статистических данных о состояниях (диагнозах) и характерных повреждениях (диагностических признаках) конструктивных элементов рассматриваемых зданий по результатам глубокого ретроспективного анализа материалов обследований прошлых лет;

- математической строгостью постановок задач, использованием апробированных теоретических положений технической диагностики и теории информации;

- результатами выполненного в работе подробного анализа полноты, информативности и устойчивости вероятностных статистических параметров диагностических матриц, выполненного с использованием различных математических методов;

- системной верификацией применяемых подходов и методов;

- согласием в области возможного сопоставления полученных результатов диагностирования состояний строительных конструкций с частными решениями по другим известным и ранее предложенным методикам;

- положительными экспертными оценками специалистов, полученными при обсуждении работы на профильных научно-технических конференциях и семинарах.

Основные теоретические положения и выводы диссертационной работы подтверждены апробацией на всероссийских и международных научно-практических конференциях, симпозиумах и конгрессах: Всероссийской научной конференции «Задачи инженерной геологии в реставрации и сохранении памятников истории и культуры», Рязань, 1993 г.; Научно-практической конференции по вопросам реставрации (памяти Г. М. Штендера), Новгород, октябрь 1993 г.; IV-й Международной конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их реше-

ния», СПбГПУ, Санкт-Петербург, октябрь 2001 г.; Международной конференции в честь 300-летия СПб «Реконструкция исторических городов и геотехническое строительство», Санкт-Петербург, июнь 2003 г.; V-й Международной конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения», СПбГПУ, Санкт-Петербург, октябрь 2003 г.; Межвузовской научной конференции СПбГПУ «XXXIII Неделя науки», Санкт-Петербург, декабрь 2005 г.; Межвузовской научной конференции СПбГПУ. «XXXV Неделя науки», Санкт-Петербург, декабрь 2007 г.; Международном симпозиуме «Современные металлические и деревянные конструкции», Брест июнь 2009 г.; Научно-техническом семинаре «Кафедра СКМ. 75 лет на факультете», СПбГПУ, Санкт-Петербург, октябрь 2009 г.; IV Международной конференции «Предотвращение аварий зданий и сооружений», Москва, декабрь 2009 г.; XIV научно-методической конференции «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций», Санкт-Петербург, ВИТУ, март 2010 г.; Международном симпозиуме «Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс», Одесса, май 2010 г.; Первой научно-практической конференции «Проблемы обследования зданий и сооружений и пути их решения», СПбГПУ, Санкт-Петербург, октябрь 2010 г.; V Международной конференции «Предотвращение аварий зданий и сооружений», Москва, декабрь 2010 г.; XV научно-методической конференции «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций», Санкт-Петербург, ВИТИ, март 2011 г.; III Национальном Конгрессе «Повышение безопасности зданий и сооружений в процессе строительства и эксплуатации», Москва, май 2011 г.; Второй научно-практической конференции «Проблемы обследования зданий и сооружений и пути их решения», СПбГПУ, Санкт-Петербург, октябрь 2011 г.; III Международном симпозиуме «Проблемы современного бетона и железобетона», Минск, ноябрь 2011 г.; Научно-практической конференции с международным участием «XLI Неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, декабрь 2012 г.; II Международном конгрессе студентов и молодых ученых (аспирантов, докторантов) «Актуальные проблемы современного строительства», СПбГАСУ, Санкт-Петербург, апрель 2013 г.; Техническом Совете ЦНИИПромзданий, Москва, июнь 2015 г., семинаре в СПбГАСУ, сентябрь 2015 г.

Результаты выполненных исследований использовались при выполнении обследований технического состояния зданий в Санкт-Петербурге, Ленинградской области, Великом Новгороде и Пскове (приложение).

Материалы диссертационной работы используются также в учебном процессе в специальных курсах по дисциплинам магистерской подготовки «Техническая эксплуатация и экспертиза зданий и сооружений», «Специальные разделы высшей математики», а также при выполнении выпускных работ по кафедре «Строительная механика и строительные конструкции» СПбПУ.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 36 научных работах, в том числе 16 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, и в одной монографии.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация изложена на 376 страницах печатного текста, состоит из введения, девяти глав, списка литературы, включающего 195 источников, и четырех приложений на 121 странице. В работе представлены 121 рисунок, 49 таблиц и 241 формула.

Во введении сформулирована проблема и обоснована актуальность исследования, поставлены цель и задачи, раскрыта научная новизна и практическая значимость.

В первой главе «Актуальные проблемы диагностики технического состояния и надежности зданий старой городской застройки» представлен обзор методов диагностирования их технического состояния и обзор методов решения задач надежности. Дано определение понятию «техническое состояние». Ссылаясь на многочисленные литературные источники и основываясь на многолетнем опыте, приводится определение области деятельности, называемой «обследование технического состояния зданий и сооружений».

Во второй главе «Объемно-планировочные и конструктивные решения зданий старой городской застройки» на основе данных имеющейся в архитектурно-исторической среде классификации, дано определение каменным зданиям старой городской застройки.

Рассмотрены конструктивные схемы зданий старой городской застройки и также представлена их классификация с учетом имеющейся в литературе информации с дополнениями из опыта их обследований.

В третьей главе «Характерные повреждения строительных конструкций зданий старой городской застройки» представлены особенности проявления повреждений и дефектов зданий старой городской застройки. Даны определения дефектов и повреждений, обобщающие существующие в различных литературных источниках определения для этих понятий. Охарактеризована и в графическом виде предложена их классификация.

Все выделенные в главе характерные повреждения конструкций зданий рассматриваются как будущие диагностические признаки, ставшие основой построения диагностических матриц.

В четвертой главе «Теоретические аспекты технической диагностики зданий» приведена методология построения диагностических процедур на основе теоретических разработок И.А. Биргера. Сформулирована постановка задачи, введены основные соотношения теории вероятностей, применительно к задачам диагностирования состояний строительных систем, представлена формула Байеса, даны принципы построения диагностических матриц и представлена формулировка решающего правила диагностирования. Далее в главе рассмотрены особенности построения решений на основе метода последовательного анализа Вальда, методов статистических решений и основные положения теории информации.

В пятой главе «Формулирование состояний строительных систем» введены понятия «состояния» и «категории состояний». Приведены данные о многочисленных разночтениях в формулировании состояний и определении их количества, которые имеют место в различных литературных источниках. Здесь же на основании изучения многочисленных литературных источников и руко-

водствуясь накопленным опытом обследований рассматриваемых зданий, предложены конкретные мероприятия по приведению их конструктивных элементов в исправное состояние.

В шестой главе «Диагностические матрицы и диагностические признаки» сформулированы понятия «комплекс признаков и их разряды» для каменных, железобетонных, стальных, деревянных и фундаментных конструкций рассматриваемых зданий, основываясь на рассмотренных ранее в главе 3, характерных повреждениях, а также подробное рассмотрение вопросов построения диагностических вероятностных таблиц. Далее исследуются вопросы устойчивости, информативности и полноты диагностических матриц. В завершение главы предложена методика определения порогового значения для вероятностных параметров состояний.

В седьмой главе для разработки моделей принятия решений о состояниях многоэлементной системы – здания в целом, создана методология построения многоуровневой, иерархической структуры диагностики, которая позволяет оценивать состояние высших структур на каждом, интересующем пользователя, уровне. Построена графическая модель диагностирования в виде «диагностического дерева», затем на этой основе приведены алгоритм построения решения и примеры расчета с использованием разработанного программного продукта «ВАТС» при прохождении по иерархии диагнозов «снизу вверх» (прямой ход). Отмечены особенности прохождения по иерархии «сверху вниз» (обратный ход).

В восьмой главе предложена методика расчета показателей надежности с использованием данных вероятностного анализа технического состояния конструктивных элементов здания. В основу построения методики расчета надежности положен принцип разделения и последующего комбинирования полученных по расчетам пяти вероятностей состояний. На этом же принципе предложенная вероятностная модель и реализованный на ее основе прямой ход диагностирования позволили также построить методику расчета физического износа элементов, групп элементов, подсистем и здания в целом на основе вероятностного подхода.

В девятой главе представлено заключение и сформулированы выводы по работе.

II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Сформулирована концепция, которая состоит в том, что разработаны методики и алгоритмы диагностирования технического состояния конструкций зданий старой городской застройки с использованием математического аппарата технической диагностики, основанного на вероятностно-статистических методах распознавания состояний и методах теории информации; предлагаемый подход для строительных конструкций применен впервые.

В основу построения диагностических процедур, как отмечено, положены теоретические разработки И.А. Биргера. Постановка задачи при использовании

вероятностных методов распознавания технической диагностики состоит в том, что имеется система, которая на момент обследования находится в одном из n случайных состояний S_i . Известна совокупность признаков K^* , каждый из которых с определенной вероятностью характеризует состояние системы. Требуется построить решающее правило, с помощью которого предъявленная (диагностируемая) совокупность признаков K^* , была бы отнесена к одному из возможных состояний (диагнозов) S_i .

Для решения поставленной задачи в работе, в первую очередь, введены основные соотношения теории вероятностей применительно к задачам диагностирования состояний строительных систем. После этого представлен вывод формулы Байеса. В обобщенном виде она имеет следующий вид

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

Здесь $P(S_i / K^*)$ – 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.

Учитывая изложенное выше, классическая формулировка решающего правила диагностирования состояний на основе метода Байеса записывается следующим образом. 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, т.е.

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

Правило (2) дополняется введением понятия порогового значения для вероятности диагноза S_i , представляющего собой некий заранее выбранный и обоснованный уровень распознавания P_i , т. е.

$$P(S_i / K^*) \geq P_i. \quad (3)$$

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

$$P(S_i / K^*) < P_i \quad (4)$$

решение о диагнозе не принимается (предлагается отказ от распознавания) и требуется поступление дополнительной информации. В данном случае при диагностировании на основе рассмотрения пяти состояний такой подход требует корректировки. В диссертации в главе 6 сделаны предложения о назначении пороговых значений вероятностей диагнозов S_i для строительных конструкций.

Далее рассмотрены особенности диагностирования состояний конструкций на основе метода последовательного анализа Вальда, являющегося частным случаем метода Байеса. Метод применяется при распознавании только двух состояний исследуемого объекта – S_1 и S_2 (дифференциальная диагностика – дихотомия). Составляется следующее соотношение

$$B < \frac{P(k_{j1}^*/S_2)}{P(k_{j1}^*/S_1)} \cdots \frac{P(k_{js}^*/S_2)}{P(k_{js}^*/S_1)} < A, \quad (5)$$

где j – количество рассматриваемых признаков, s – количество их рядов. Если это условие выполняется в указанном виде, то решение о диагнозе не принимается; требуется либо поступление дополнительной информации, либо исключение малоинформативной статистики.

Широкое применение в технике (в радиолокации, радиотехнике, общей теории связи и других областях) получили методы статистических решений. В диссертации для строительных конструкций рассматриваемых зданий предложена процедура построения решения на этой основе. Получены соотношения, которые в дальнейшем вероятностном анализе используются для обоснования назначения пороговых вероятностных параметров. Приводится пример диагностики состояний конструкций монолитного железобетонного перекрытия здания по прогибу V (признаку V) составляющих его элементов – главных или второстепенных балок. Задача состоит в выборе значения V_0 этого признака таким образом, что при $V > V_0$ следует принимать решение о необходимости проведения мероприятий по усилению балки. В случае $V < V_0$ можно считать состояние удовлетворительным.

Далее принимается, что разделение осуществляется на два состояния, т. е. задача решается в рамках правил и понятий дифференциальной диагностики. Предлагается считать, что S_1 и S_2 – удовлетворительное и неудовлетворительное состояния перекрытия по рассматриваемому признаку V , соответственно. Тогда решающее правило диагностирования состоит в следующем:

$$\text{при } V < V_0 \quad V \in S_1; \quad \text{при } V > V_0 \quad V \in S_2. \quad (6)$$

Распределение вероятностей признака V для указанных состояний может иметь вид, представленный на рисунке 1 (нормальное распределение). Показано, что области S_1 и S_2 пересекаются, поэтому принципиально невозможно выбрать значение V_0 , при котором правило (6) не давало бы ошибочных решений. Задача состоит в том, чтобы выбор V_0 был в некотором смысле оптимальным. Тогда, при принятии решения о диагностировании состояний рассматриваются возможные ошибки: «ложная тревога» и «пропуск дефекта».

Для этого записываются выражения вероятности «ложной тревоги», вероятности «пропуска дефекта» и, наконец, вероятности принятия ошибочного решения. Если ошибкам приписать «цены» (C_{21} и C_{12} , соответственно), то выражение для среднего риска записывается в виде следующей суммы

$$R = C_{21}P(S_1) \int_{V_0}^{+\infty} f(V/S_1)dV + C_{12}P(S_2) \int_{-\infty}^{V_0} f(V/S_2)dV. \quad (7)$$

Граничное значение V_0 в правиле (6) из условия минимума среднего риска определяется после дифференцирования выражения (7) по V_0 и приравнивания нулю первой производной

$$\frac{f(V_0/S_1)}{f(V_0/S_2)} = \frac{C_{12}P(S_2)}{C_{21}P(S_1)}. \quad (8)$$

Это граничное значение V_0 , обозначенное λ и представляющее собой правую часть равенства (8)

$$\lambda = C_{12}P(S_2)/C_{21}P(S_1) \quad (9)$$

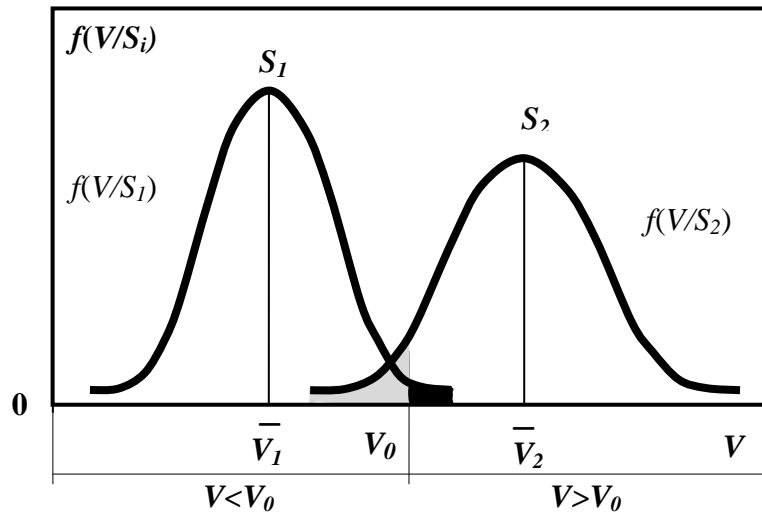


Рисунок 1 – Статистические распределения плотности вероятностей диагностического параметра V для удовлетворительного S_1 и неудовлетворительного S_2 состояний; $f(V/S_1)$ и $f(V/S_2)$ – плотности вероятности для V при S_1 и S_2 , соответственно

и называется пороговым значением для случая диагностирования на основе дифференциальной диагностики, т. е. при рассмотрении двух состояний.

Предложенные выше методы построения решений на основе дифференциальной диагностики (метод Вальда и методы статистических решений) в данном исследовании выполняют вспомогательную функцию.

В диссертации в главе 6 показано, как зависимость (9) использована при формулировании понятия порогового значения для принятия решения о назначении одного из пяти рассматриваемых в работе состояний диагностирования, но в том случае, когда решение сводится до рамок дифференциальной диагностики.

2. Для основных конструкций рассматриваемых зданий построены специальные вероятностные таблицы – диагностические матрицы; для этого собран значительный материал по статистике состояний (диагнозов) и характерных повреждений (диагностических признаков) конструкций, который в данной работе упорядочен и уложен в рамки имеющихся, разработанных методик теоретического аппарата технической диагностики и теории информации.

Основу процедуры диагностирования конструкций рассматриваемых зданий составляют статистические данные ретроспективного анализа многочисленных обследований прошлых лет.

Отмечено, что в первую очередь при диагностировании с использованием аппарата теоретических методов технической диагностики вводится понятие «состояние» (диагноз), потом понятие «категории состояния» и определяется их количество. Приведены данные о многочисленных разночтениях в формулировании состояний и определении их количества, которые имеют место в раз-

личных литературных источниках. Составлена таблица, в которой представлено имеющееся на сегодняшний день толкование понятия «категория технического состояния», введенное тем или иным источником. В таблице показано, что «шкала» состояний меняется в пределах от трех (короткая) до семи (длинная). Подробнее и четче всего категории технического состояния изложены в пособиях АО «ЦНИИпромзданий, для всех конструкций в пособии В.В. Ремнева, а также в пособии А. И. Бедова и В. Ф. Сапрыкина, но только для каменных и железобетонных конструкций. В нормативных же документах формулировки носят довольно общий характер, как в части определений, так и в части необходимых мероприятий по степени вмешательства в конструктивную систему для приведения ее элементов в исправное состояние. Следует заметить, что в нормативных документах категории технического состояния для деревянных конструкций отсутствуют вообще.

Отмечено, что все эти обстоятельства четкости при принятии конкретных решений в реальной практической деятельности не добавляют. В связи с этим в диссертации обосновано и принято решение в дальнейшем вероятностном анализе техническое состояние строительных систем рассматривать на основе пяти категорий, сформулированных в СП 13-102-2003. Учитывая, что этот документ широко используется исполнителями работ вот уже более 10 лет и хорошо известен заказчикам, предложено сохранить и принятые в нем названия категорий технического состояния.

После формулирования состояний следующим понятием процедуры диагностирования с использованием аппарата теоретических методов технической диагностики является понятие «диагностические признаки».

И состояния, и признаки, выраженные, как отмечено ранее, в наиболее приемлемой для диагностирования вероятностной форме, составляют основу построения диагностических матриц, которые являются главным документом при определении вероятностей состояний по методу Байеса. Диагностическая матрица – это набор чисел, статистических данных о состояниях, полученных в ходе большого количества обследований рассматриваемых объектов, определенным образом упорядоченных и представленных в табличном виде. То есть матрица формируется в виде таблицы вероятностей состояний, вероятностей признаков и их разрядов при различных состояниях. Вид таблиц и упорядочение данных предложены автором. Вид, предлагаемый в литературных источниках, ненагляден и неудобен.

От правильности построения диагностических матриц, уверенности эксперта в достоверности собранного для их формирования статистического материала, т. е. от уверенности в достоверности, устойчивости и информативности компонентов диагностических матриц, как входных данных в байесовскую процедуру диагностирования, зависит итоговый результат, его достоверность и уверенность в правильности принятого решения по распознаванию состояний. Диагностические матрицы участвуют в построении решения на основе урвневой формулировки задачи на самом «низшем» (базисном) уровне и только на этом уровне проходят байесовскую обработку накопленной статистики. Это уровень отдельных конструктивных элементов, из которых для рассматриваемых

мых зданий далее составляются вышележащие группы элементов, строительные подсистемы и подструктуры и, наконец, здание в целом. Всего для построения диагностической процедуры здания в целом в диссертации на основе статистических данных обследований прошлых лет и их анализа построено двадцать четыре диагностические матрицы для всех характерных конструкций старых зданий. Матрицы приведены в приложениях.

3. Доказаны полнота, информативность и устойчивость диагностических матриц для характерных конструктивных элементов зданий с использованием различных методов: методов теории информации (анализ диагностических веса и ценности обследования), методов аппроксимации дискретных вероятностных статистических распределений непрерывными функциями, методами теории интервальных оценок и методами теории нечетких множеств; указанные методы для диагностирования конструкций рассматриваемых зданий на основе рассмотрения пяти состояний применены впервые.

Имея в виду важность прохождения базисного уровня, кроме описания состояний, признаков и особенностей формирования диагностических матриц, последние подвергаются всестороннему анализу на предмет выявления степени влияния «входа» в этот уровень (входной статистики) на «выход» из него (апостериорные данные).

В первую очередь для характерных примеров конструктивных элементов исследуются полученные обследовательской статистикой дискретные распределения априорных вероятностей состояний $P(S_i)$ и определяются аппроксимирующие эти распределения известные из математики непрерывные функции. Анализируется возможность такой аппроксимации, возникающие погрешности, их влияние на искомый результат. Показано (в том числе и на конкретных примерах), что с достаточной степенью точности такой подход может быть использован, особенно, при недостаточном объеме статистической информации или вообще при ее отсутствии. Показано, что полученные результаты свидетельствуют об устойчивости и информативности диагностических матриц с тем же объемом априорной статистики. Приведены примеры аппроксимации статистических распределений для кирпичных кладок стен, элементов железобетонных и сталедревянных перекрытий и деревянных конструкций крыши (частично это проиллюстрировано на рисунке 2).

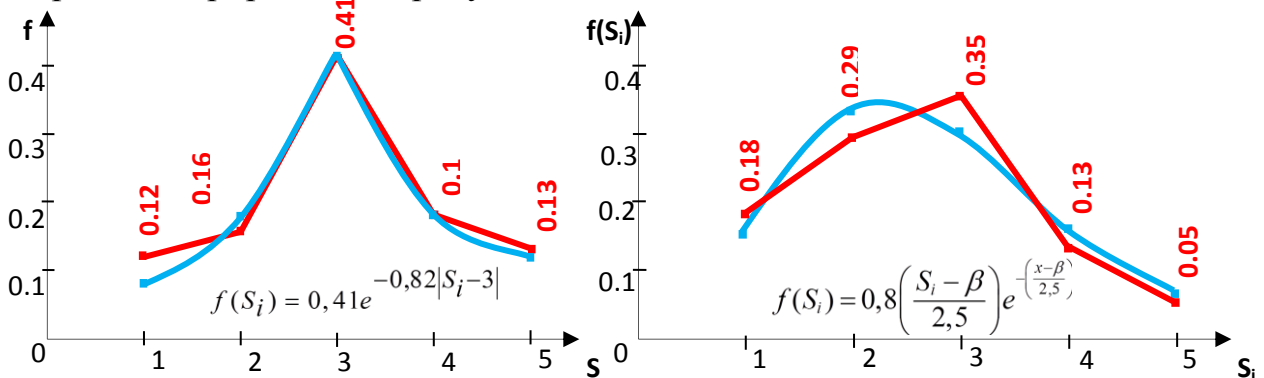


Рисунок 2 – Пример аппроксимации статистических распределений для кирпичных стен (распределение Лапласа) и главных балок перекрытий (распределение Вейбулла)

Анализ информативности, устойчивости и полноты вероятностной статистики диагностических матриц проводится далее с позиций таких понятий теории информации, как диагностический вес и диагностическая ценность признаков (или малоинформативность признаков), а также диагностическая ценность самого обследования. Для элементов строительных систем такие методики реализованы впервые.

Вводится понятие диагностического веса признаков. Тогда информация о конкретном состоянии (диагнозе) S_i , которой обладает состояние признака k_{js} , в теории информации может быть определена по формуле

$$Z_{S_i}(k_{js}) = \log \frac{P(k_{js} / S_i)}{\sum_{i=1}^n P(S_i)P(k_{js} / S_i)}. \quad (10)$$

Если требуется оценить диагностический вес простого признака k_j , имеющего только две реализации («да» или «нет»), то

$$Z_{S_i}(k_j) = \log \frac{1 - P(k_j / S_i)}{P(k_j)}, \quad (11)$$

Выполненный вероятностный анализ диагностического веса по всем реализациям признака приводит к необходимости введения еще одного понятия теории информации – информативной или диагностической ценности обследования.

Под диагностической ценностью обследования по признаку k_j для состояния S_i подразумевается доля информации, вносимая всеми реализациями этого признака в установление этого состояния. Зависимость для m -разрядного признака предлагается записать в следующем виде

$$Z_{S_i}(k_j) = \sum_{s=1}^m P(k_{js} / S_i) Z_{D_i}(k_{js}) = \sum_{s=1}^m P(k_{js} / S_i) \log \frac{P(k_{js} / S_i)}{\sum_{i=1}^n P(S_i)P(k_{js} / S_i)}. \quad (12)$$

Расчет значений $Z_{S_i}(k_{js})$ выполнен на примере диагностирования состояний главной балки монолитного железобетонного перекрытия в соответствии с полученными для этой балки статистическими данными в виде диагностической матрицы с девятью признаками и с соответствующей их реализацией. На этом примере продемонстрирован эффект увеличения степени определенности состояния элемента системы – балки (более, чем в 1,5 раза) после исключения из расчетной байесовской процедуры малоинформативной статистики. Разработанные методики позволяют выполнить такой анализ.

Важным достоинством диагностирования на основе пяти состояний, принятых в данном исследовании, является возможность привнесения в используемую байесовскую процедуру достоинств и особенностей других подходов и методов технической диагностики. Одним из них является метод Вальда, применяемый при распознавании состояний на основе дифференциальной диагностики. Он использован в данной работе с целью оценки устойчивости и информативности диагностических матриц. Для применения метода Вальда в предлагаемой методологии, основанной на рассмотрении пяти состояний, их вероят-

ности предлагается разделить, а затем скомбинировать, например, по принципу $3 + 2$. Принцип состоит в том, что сумма априорных и апостериорных вероятностей первых трех состояний означает вероятность удовлетворительного состояния объекта $P(S_u)$, а сумма остальных принимается как вероятность неудовлетворительного состояния $P(S_{nu})$. Очевидно, что $P(S_u) + P(S_{nu}) = 1$. В диссертации рассмотрен пример применения метода Вальда для той же главной балки монолитного железобетонного перекрытия с теми же вероятностными параметрами и тем же, что и выше, набором реализаций признаков. Предпринятые изменения входных параметров диагностической матрицы не повлияли на качественную картину выходной апостериорной информации, что свидетельствует об устойчивости диагностической матрицы и к таким изменениям.

Оценена степень влияния изменчивости входной информации (априорной статистики) на выходную (распределение апостериорных вероятностей) с использованием методик интервального подхода. Исходные данные S_i в таком случае предлагается представлять интервалами («интервальными числами») $[S_i^l, S_i^r]$, задаваемыми их левыми S_i^l и правыми S_i^r границами. Результирующие показатели, рассчитанные с использованием принятых для анализа моделей, и связанные с исходными данными, также становятся интервальными числами. В качестве примера рассмотрено влияние разброса только статистических априорных вероятностей состояний, как основного параметра диагностирования, т. е. влияние разброса величин $P(S_i)$ – входного параметра, на искомый результат – апостериорные значения вероятностей $P(S_i / K^*)$, как выходной параметр. В связи с этим, для входных вероятностей $P(S_i)$ потребовалось обосновать определение границ интервальных чисел.

На основе многовариантного счета получены результаты, которые с большой степенью убедительности подтвердили устойчивость диагностических матриц. Численно показана стабильность качественного результата диагностирования даже в том случае, когда априорные вероятности состояний вводились в байесовскую процедуру расчета в виде равновероятного распределения, т. е. при максимальной энтропии.

Для оценки устойчивости и информативности априорной статистики при диагностировании пяти состояний элементов строительных конструкций зданий старой городской застройки использованы методы теории нечетких множеств. Представлены основные положения для проведения анализа технического состояния того же объекта – главной балки междуэтажного перекрытия, но с использованием методов и аппарата теории нечеткой логики. Приняты те же диагнозы (пять состояний), признаки (девять признаков) и та же их реализация. В основу диагностирования состояний рассматриваемого элемента предлагается положить алгоритм постановки диагноза, разработанный в трудах А.П. Ротштейна, С.Д. Штовбы.

В этой методике параметры k_i (признаки, для балок $i = 1, \dots, 9$) в соответствии с понятиями теории нечетких множеств рассматриваются далее, как лингвистические переменные. Они делятся на три группы: k_1, k_2, k_4 – группа параметров, определяемых при обследовании визуально; k_3, k_5, k_6, k_7 – группа параметров, определяемых по результатам инструментальных измерений; k_8, k_9 –

группа параметров, определяемых по результатам поверочных расчетов. Кроме того, вводится лингвистическая переменная s , которая измеряется диапазоном состояний-диагнозов $S_1 - S_5$. Структура модели для проведения диагностики состояний рассматриваемой балки представляется в виде следующих соотношений:

$$s = f_s(x, y, z); \quad x = f_x(k_1, k_2, k_4); \quad y = f_y(k_3, k_5, k_6, k_7); \quad z = f_z(k_8, k_9). \quad (13)$$

Для оценки значений лингвистических переменных $k_1 - k_9$, а также переменных x , y и z , вводится единая шкала качественных термов: Н – низкий; нС – ниже среднего; С – средний; вС – выше среднего; В – высокий.

Каждый из этих термов представляет собой нечеткое множество, заданное с помощью соответствующей функции принадлежности. Пользуясь введенными качественными термами и анализируя интервалы изменения численных значений вероятностей реализации признаков $p(k_{js}/S_i)$ в диагностической матрице для главной балки, соотношения (13) представлены в табличной форме, на основе которой записаны системы нечетких логических уравнений, связывающих функции принадлежности диагнозов и входных лингвистических переменных.

В работах А.П. Ротштейна, С.Д. Штовбы отмечено, что в общем случае каждая входная переменная $k_1 - k_9$ имеет свои собственные функции принадлежности нечетким термам (Н, нС, С, вС, В), которые используются в этих уравнениях. Однако, для упрощения дальнейшего моделирования в рамках, так называемой, грубой настройки нечеткой базы знаний, для всех переменных $k_1 - k_9$ принята только одна, наиболее проверенная, форма функции принадлежности. Для этого интервалы изменения каждой переменной приводятся к одному универсальному интервалу (0, 1, 2, 3, 4), что осуществляется с помощью следующих соотношений:

$$\mu^t(k_j) = \tilde{\mu}^t(u); \quad u = 4 \frac{k_j - k_j}{k_j - k_j}, \quad t = H, нС, С, вС, В, \quad (14)$$

где (k_j, k_j) – интервал изменения переменной k_j , $j = 1, 2, \dots, 9$.

Тогда аналитическая модель функции принадлежности принята в виде

$$\tilde{\mu}^t(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u-b}{c}\right)^2}. \quad (15)$$

Параметр b для термов Н, нС, С, вС, В принимает значения 0, 1, 2, 3, 4, соответственно. Параметр c для всех термов одинаков и равен $c = 0,923$.

Выбор соотношений (14,15) и параметров b и c в указанном виде обусловлен тем, что они являются хорошей проверенной аппроксимацией функций принадлежности. Далее нечеткие логические уравнения вместе с функциями принадлежности нечетких термов (15) позволяют принимать решение о конкретном диагнозе по алгоритму, предложенному А.П. Ротштейном.

Приведен пример диагностирования состояний главной балки перекрытия на основе двух подходов – метода Байеса и методов нечеткой логики с одинаковыми входными параметрами. Результаты расчетов привели практически к

совпадающим выводам, еще раз подтверждающим устойчивость и полноту входной статистики при применении байесовской процедуры диагностирования.

4. С использованием статистических методов технической диагностики и результатов проведенного численного эксперимента для конструкций рассматриваемых зданий получен минимально приемлемый пороговый уровень диагностирования, позволяющий несколько видоизменить традиционное в технической диагностике решающее правило о назначении диагнозов элементам технических систем.

В диссертации предложена методика определения порогового значения для вероятностных параметров пяти состояний.

Предложена следующая последовательность решения этой задачи:

– как и ранее, выполняется разделение, а затем комбинирование пяти априорных вероятностей состояний по принципу 3 + 2 и вводятся априорные вероятности $P(S_u)$ и $P(S_{nu})$ и апостериорные $P(S_u/K^*)$ и $P(S_{nu}/K^*)$;

– далее в основу построения решения предлагается положить выражение (9), полученное ранее при анализе состояний на основе дифференциальной диагностики и определяющее значение параметра λ в принятых выше обозначениях по зависимости

$$\lambda = C_{12}P(S_{nu})/C_{21}P(S_u); \quad (16)$$

– максимум из минимально приемлемых соотношений априорных вероятностей $P(S_{nu}) / P(S_u)$ в зависимости (16) получается тогда, когда все пять состояний S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 равновероятны, т. е. при условии полного отсутствия априорной статистики состояний для рассматриваемого элемента системы. Это соответствует максимальной неопределенности состояний (максимальной энтропии). Тогда очевидно, что $P(S_{nu}) = 0,40$, а $P(S_u) = 0,60$. Если эти значения подставить в формулу (16), то выражение для параметра λ будет иметь вид

$$\lambda = 0,667 \frac{C_{12}}{C_{21}}; \quad (17)$$

– численные значения ценовых параметров C_{12} и C_{21} неизвестны; однако, понятно, что цена ошибки C_{12} («пропуск дефекта») должна быть значительно выше, нежели цена ошибки C_{21} («ложная тревога»), т. е. отношение (C_{12} / C_{21}) может принимать значения $(C_{12} / C_{21}) \geq 1$, а может быть даже $(C_{12} / C_{21}) \gg 1$. Максимально возможное их соотношение, имеющее смысл при построении вероятностного анализа в данном случае – это когда оно составляет величину, равную всего 1,50, т. е. $(C_{12} / C_{21}) = 1,50$. В этом случае параметр λ получается равным единице. Пороговое значение для вероятностей состояний таким быть не может, и диагностирование в таком случае тоже становится бессмысленным;

– очевидно, что минимальный пороговый уровень может быть получен при $(C_{12} / C_{21}) = 1,0$, т. е. при равноценности ошибок, что, в принципе, в условиях неопределенности ценовых параметров C_{12} и C_{21} , является вполне возможным допущением. В этом случае по минимуму параметр λ получается равным

$$\lambda_{min} = 0,667. \quad (18)$$

Полученное значение при диагностировании состояний строительных конструкций вполне допустимо в первом приближении принять как приемлемый пороговый вероятностный уровень распознавания. Следует отметить, что принятие такого решения подкреплено еще и результатами проведенных численных экспериментов, выполненных для нескольких конструктивных элементов зданий. Результаты многочисленных расчетов показали разброс вероятностей $P(S_u/K^*) = P(S_1/K^*) + P(S_2/K^*) + P(S_3/K^*)$ в пределах $P(S_u/K^*) = 0,678 - 0,728$.

Результат, как видно, хорошо согласуется с (18). Проведенное исследование дает основание для принятия решения о назначении вероятностного порогового уровня распознавания состояний строительных систем в следующем виде

$$P_i = 0,690. \quad (19)$$

Таким образом, при диагностировании состояний строительных конструкций зданий, основанном на рассмотрении пяти диагнозов и на их разделении с последующим комбинированием, можно решающее правило диагностирования состояний (2) сформулировать с учетом следующих уточнений.

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, т.е. $K^* \in S_i$, если $P(S_i/K^*) > P(S_j/K^*)$ ($j = 1, 2, \dots, n$; $i \neq j$); при этом $P(S_u/K^*) = P(S_1/K^*) + P(S_2/K^*) + P(S_3/K^*) > P_i = 0,690$ – для первых работоспособных состояний или $P(S_{nu}/K^*) = P(S_4/K^*) + P(S_5/K^*) > 1 - P_i = 0,310$ – для остальных состояний.*

5. С использованием методов теории информации для объектов исследования сформулированы понятия максимальная энтропия (абсолютная и с учетом априорной статистики), остаточная энтропия (степень определенности или количество внесенной информации), вероятность степени определенности, позволившие поставить и решить задачу о построении процедуры принятия решений о состояниях здания, как многоэлементной технической системы.

В процедуру принятия решений о назначении диагноза для строительных конструкций введены необходимые положения теории информации, основным из которых является понятие энтропии системы. Энтропия в теории информации характеризует степень неопределенности состояний системы.

Пусть рассматривается элемент технической системы G (например, главная балка монолитного железобетонного перекрытия), который по совокупности признаков K^* может иметь несколько случайных состояний S_i с апостериорными вероятностями $P(S_i/K^*)$, полученными по расчету по формуле Байеса (1).

В теории информации энтропия системы, имеющей n возможных состояний с вероятностями $P(S_1/K^*)$, $P(S_2/K^*)$, ..., $P(S_n/K^*)$ определяется зависимостью

$$H(G) = \sum_{i=1}^n P(S_i / K^*) \log \frac{1}{P(S_i / K^*)} = - \sum_{i=1}^n P(S_i / K^*) \log P(S_i / K^*). \quad (20)$$

Для рассматриваемого элемента системы G , имеющего n состояний при условии их равновероятности, энтропия определится формулой

$$H(G) = - \sum_{i=1}^n P(S_i / K^*) \log P(S_i / K^*) = n \frac{1}{n} \log n = \log n. \quad (21)$$

Очевидно, что с увеличением числа состояний энтропия возрастает, но гораздо медленнее, чем число состояний. В таком случае важное свойство энтропии состоит в следующем: если система имеет несколько состояний, то энтропия будет максимальной в том случае, когда все состояния равновероятны. В литературе приводится доказательство этому, из которого вытекает важная оценка энтропии произвольной системы

$$H(G)_{\max} \leq \log n, \quad (22)$$

где n – число возможных состояний системы.

Например, при количестве состояний $n = 5$ значение $H(G)_{\max} = \log 5 \approx 0,700$. Чем ближе энтропия элемента системы к этому значению, тем больше неопределенность при распознавании его состояний. Чем она дальше, т. е. ближе к нулю, тем неопределенность ниже, а значит выше определенность.

Если система состоит из k элементов, каждый из которых имеет n состояний, то максимально возможная энтропия такой системы определится в зависимости от общего числа ее возможных состояний N . Если каждый элемент может иметь n состояний и состояния одного элемента произвольно сочетаются с состояниями других, то в общем случае при k элементах число состояний получится равным $N = n^k$. Тогда, как известно, максимально возможная энтропия

$$H_{\max} = \log N = k \log n. \quad (23)$$

Например, при $n = 5$ (состояния) и $k = 2$ (элементы) значение $H_{\max} = 2 \cdot \log 5 \approx 1,400$.

Далее, после вычисления $H(G)$ и $H(G)_{\max}$ вводится понятие степени определенности рассматриваемого элемента системы в соответствии с зависимостью

$$V(G) = H(G)_{\max} - H(G). \quad (24)$$

По терминологии, принятой в теории информации, величину $V(G)$ называют «остаточной энтропией» или «количеством внесенной информации». В дальнейшем исследовании величина $V(G)$ участвует в процедуре построения уровневого решения по диагностированию состояний конструктивных элементов, групп элементов и подсистем здания, выполняя передаточные функции информационного вклада технического состояния при переходе от уровня к уровню.

Использование полученных параметров в дальнейшем вероятностном анализе рассмотрено на примере расчета энтропии более сложной конструктивной системы, состоящей из двух элементов перекрытия (группы из двух конструктивных элементов), например, главных балок G_1 и G_2 .

Требуется определить энтропию для некоторой объединенной группы элементов $G = G_1G_2$, которая определяется сочетанием состояний отдельных элементов G_1 и G_2 , далее названных базисными.

Принято, что реализация одного из состояний балки G_1 не влияет на вероятность возможного состояния балки G_2 , т. е. состояния рассматриваемых элементов считаются статистически независимыми. При этом состояния обеих балок, рассматриваемые как случайные события, могут быть зафиксированы одновременно, т. е. эти события совместны. Таким образом, на начальном этапе диагностирования, следуя понятиям теории вероятностей, предлагается иметь дело с событиями совместными, но независимыми.

Основываясь на данных литературных источников, выражение для вычисления энтропии рассматриваемой объединенной группы G_1G_2 , в таком случае, в общем виде можно записать следующим образом

$$H(G_1G_2) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(G_{1i}G_{2j}) \log P(G_{1i}G_{2j}). \quad (25)$$

В диссертации представлен вывод величины $H(G_1G_2)$. Показано, что энтропия объединенной группы, объединяющей состояния двух статистически независимых элементов, равна сумме энтропий этих элементов. Показано также, что это относится и к остаточной энтропии.

$$H(G_1G_2) = H(G_1) + H(G_2); \quad V(G_1G_2) = V(G_1) + V(G_2). \quad (26)$$

Выражения для определения относительных значений степени определенности (вероятности степени определенности), необходимые для уровневого построения решения, введены ниже.

6. Для разработки моделей принятия решений о состояниях здания в целом, создана методология построения многоуровневой, иерархической структуры диагностики, которая позволяет оценивать состояние конструкций здания как структур иерархии на каждом уровне; построена графическая модель диагностирования в виде «диагностического дерева».

В основу построения уровневой модели положен принцип передачи информации о состояниях с низших на последующие уровни через информационный вклад вероятностных параметров состояний отдельных элементов, в вероятностные параметры состояний групп элементов и подсистем следующих уровней иерархии. Этот информационный вклад (или доля) формулируется и определяется с использованием понятий и методов теории информации. Для этого в первую очередь построена графическая модель диагностирования в виде «диагностического дерева».

Построение «диагностического дерева» рассмотрено на примере типичного для старой застройки здания. Полученная графическая модель в диссертации представлена в виде шестиуровневой иерархической структуры.

Разработан алгоритм построения решения для уровневого вероятностного анализа состояний элементов иерархической структуры в общем виде и выведены зависимости, позволяющие осуществлять переход с уровня на уровень.

Таким образом, создана своеобразная математическая переходная модель для продвижения с низших уровней на высшие, обеспечивающая прямой ход диагностирования (по «дереву диагнозов» – продвижение снизу вверх).

Уровневое построение решения продемонстрировано на примере диагностирования состояний элементов и групп элементов монолитного железобетонного перекрытия, как отдельной ветви «дерева диагнозов».

Построение процедуры вычислений по формуле Байеса (1) в работе показано на примере диагностирования одной из главных балок G_1 .

По формуле (1) вычисляются апостериорные вероятности состояний данного элемента (балки G_1), а затем, по аналогии, для всех элементов группы «главные балки G_k » ($k = 1, 2, \dots, g$). После этого осуществляется анализ полученных результатов с использованием аппарата теории информации. Аналогичные расчеты выполняются затем для всех групп: «второстепенные балки W_k » ($k = 1, 2, \dots, w$), «плитные участки F_k » ($k = 1, 2, \dots, f$), «колонны L_k » ($k = 1, 2, \dots, l$) и, наконец, для конструктивной подсистемы «междуэтажное перекрытие» в целом.

Методика и последовательность построения решения продемонстрирована на примере главных балок перекрытия G_k . Данные диагностирования их состояний представлены в виде следующего ряда апостериорных вероятностей $P(G_{kr}/K_1^*)$:

$$P(G_{11}/K_1^*); \quad P(G_{12}/K_1^*); \quad P(G_{13}/K_1^*); \quad P(G_{14}/K_1^*); \quad P(G_{15}/K_1^*);$$

$$P(G_{21}/K_1^*); \quad P(G_{22}/K_1^*); \quad P(G_{23}/K_1^*); \quad P(G_{24}/K_1^*); \quad P(G_{25}/K_1^*);$$

$$\dots \dots \dots$$

$$P(G_{k1}/K_1^*); \quad P(G_{k2}/K_1^*); \quad P(G_{k3}/K_1^*); \quad P(G_{k4}/K_1^*); \quad P(G_{k5}/K_1^*).$$

После получения этих данных для оценки степени неопределенности (или определенности) выявленных состояний анализ полученных значений $P(G_{kr}/K_1^*)$ предлагается выполнить с использованием теории информации.

Выше показано, что энтропия состояний группы, объединяющей два и более статистически независимых элемента, равна сумме энтропий состояний этих элементов (26). Тогда, по аналогии, энтропия состояний группы элементов «главные балки» $H(G_1G_2\dots G_g)$, в общем виде определится формулой

$$H(G_1G_2\dots G_g) = \sum_{k=1}^g H(G_k) = H(G_1) + H(G_2) + \dots + H(G_g).$$

Максимально возможная энтропия такой системы

$$H(G_1G_2\dots G_g)_{\max} = g \log n_{\max}.$$

Тогда количество внесенной информации

$$V(G_1G_2\dots G_g) = \sum_{k=1}^g V(G_k) = V(G_1) + V(G_2) + \dots + V(G_g).$$

Величина $V(G_1G_2\dots G_g)$ характеризует степень определенности или количество внесенной информации для объединенной группы «главные балки» $G = G_1G_2\dots G_g$. Она оценивает информационный вклад группы в состояние системы следующего, более высокого, уровня, в данном случае конструктивной подсистемы «междуэтажное перекрытие».

Ее еще называют «остаточной энтропией» по отношению к максимальному значению, т. е.

$$V(G_1G_2...G_g) = H(G_1G_2...G_g)_{max} - H(G_1G_2...G_g).$$

Параметр $V(G_1G_2...G_g)$ в структурном энтропийном анализе состояний играет важную роль. Это некий носитель информации о том долевым вкладе состояний, в данном примере, объединенной группы «главные балки», который она вносит в состояние следующего уровня иерархии – «междуэтажное перекрытие», т. е. это величина, осуществляющая передаточные функции от низшего уровня к высшему. Так как в вероятностном анализе она участвует при каждом переходе от уровня к уровню, меняя лишь численные значения в зависимости от ступени иерархии, то сама по себе она тоже должна быть выражена в относительном, а точнее, в вероятностном виде.

В данной работе вводится понятие вероятностей степени определенности, необходимых для описания состояний элементов диагностирования в процедуре предлагаемого структурного анализа, как зависимостей, имеющих для главных балок, следующий вид

$$\begin{aligned} P(V_1) &= V(G_1)/V(G_1G_2...G_g); \\ P(V_2) &= V(G_2)/V(G_1G_2...G_g); \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ P(V_k) &= V(G_k)/V(G_1G_2...G_k), \\ &(k = 1, 2, \dots, g) \end{aligned}$$

где $V(G_k)$ – степень определенности («остаточная энтропия» или количество внесенной информации) состояний каждой главной балки G_k .

Окончательно вероятности реализации пяти категорий технического состояния для объединенной группы $G_1G_2 \dots G_g$ вычисляются по формулам, предложенным автором в качестве переходной модели от уровня к уровню. На данном переходе они имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} P_1(G_1G_2...G_g)/K_1^* &= \sum_{k=1}^g P(G_{k1}/K_1^*)P(V_k) = P(G_{11}/K_1^*)P(V_1) + P(G_{21}/K_1^*)P(V_2) + \dots + P(G_{g1}/K_1^*)P(V_g); \\ P_1(G_1G_2...G_g)/K_1^* &= \sum_{k=1}^g P(G_{k2}/K_1^*)P(V_k) = P(G_{12}/K_1^*)P(V_1) + P(G_{22}/K_1^*)P(V_2) + \dots + P(G_{g2}/K_1^*)P(V_g); \\ P_1(G_1G_2...G_g)/K_1^* &= \sum_{k=1}^g P(G_{k3}/K_1^*)P(V_k) = P(G_{13}/K_1^*)P(V_1) + P(G_{23}/K_1^*)P(V_2) + \dots + P(G_{g3}/K_1^*)P(V_g); \\ P_1(G_1G_2...G_g)/K_1^* &= \sum_{k=1}^g P(G_{k4}/K_1^*)P(V_k) = P(G_{14}/K_1^*)P(V_1) + P(G_{24}/K_1^*)P(V_2) + \dots + P(G_{g4}/K_1^*)P(V_g); \\ P_1(G_1G_2...G_g)/K_1^* &= \sum_{k=1}^g P(G_{k5}/K_1^*)P(V_k) = P(G_{15}/K_1^*)P(V_1) + P(G_{25}/K_1^*)P(V_2) + \dots + P(G_{g5}/K_1^*)P(V_g); \end{aligned} \tag{27}$$

Эти зависимости можно записать в матричной форме, в которой удобно выполнять необходимые вычисления

$$\{P_i(G_1G_2...G_g)/K_1^*\} = \{P(V_k)\} [P(G_{ki})].$$

Таким образом, окончательно по результатам вычислений могут быть получены апостериорные вероятности состояний группы «главные балки» в виде зависимостей

$$P_1(G_k) = P_1(G_1 G_2 \dots G_k) / K_1^*; \quad P_2(G_k) = P_2(G_1 G_2 \dots G_k) / K_1^*; \quad P_3(G_k) = P_3(G_1 G_2 \dots G_k) / K_1^*;$$

$$P_4(G_k) = P_4(G_1 G_2 \dots G_k) / K_1^*; \quad P_5(G_k) = P_5(G_1 G_2 \dots G_k) / K_1^*;$$

Вероятностный анализ состояний второстепенных балок W_k ($k = 1, 2, \dots, w$), плитных участков F_k ($k = 1, 2, \dots, f$) и колонн L_k ($k = 1, 2, \dots, l$) выполнен с использованием аналогичного подхода также на основе полученных по результатам многочисленных обследований перекрытий подобного типа, диагностических матриц.

Таким образом, окончательно для четырех групп элементов перекрытия – «главные балки», «второстепенные балки», «плитные участки» и «колонны» получены вероятностные параметры, по которым можно выполнить анализ состояния конструктивной подсистемы «перекрытие», обозначенное $U(GWFL)$.

Далее для нее, следуя рассмотренной выше методике, определены следующие вероятностные параметры

$$H(U_k) = \sum_{k=1}^u H(U_k) = H(U_1) + H(U_2) + H(U_3) + H(U_4),$$

$$V(U_k) = \sum_{k=1}^u V(U_k) = V(U_1) + V(U_2) + V(U_3) + V(U_4).$$

Вероятности степени определенности вычислены по аналогичным формулам

$$P(V_1) = V(U_1)/V(U_k); \quad P(V_2) = V(U_2)/V(U_k); \quad P(V_3) = V(U_3)/V(U_k);$$

$$P(V_4) = V(U_4)/V(U_k).$$

Тогда окончательно вероятности реализации пяти категорий технического состояния для объединенной подсистемы «междуэтажное перекрытие» вновь определяются по зависимостям перехода на этот уровень, аналогичным (27). Аналогичной является и матричная запись

$$\{P_i(U_k)\} = \{P(U_k)\} [P(U_{ki})].$$

Пример расчета проиллюстрирован на рисунке 3. Такие же процедуры построены и для остальных конструктивных систем здания (другие перекрытия, стены, конструкции крыши и фундаменты).

7. Разработан программный продукт «ВАТС», который реализует расчеты необходимых вероятностных параметров на каждом уровне на основе уровневой постановки задачи и который вполне может рассматриваться как элемент интеллектуального экспертно-вычислительного комплекса (ИЭВК); с использованием «ВАТС» выполнены расчеты и приведены их примеры для анализа диагнозов конструктивных элементов здания в рамках прямого хода диагностирования, т. е. снизу вверх по «диагностическому дереву».

Для выполнения расчетов и проведения численных экспериментов разработан программный продукт «ВАТС», который является компьютерной моделью, реализующей вероятностный метод оценки технического состояния зданий и сооружений в программной среде Microsoft Excel.

Рассмотрен численный пример построения решения для выполнения многоуровневого вероятностного анализа технического состояния всех элементов,

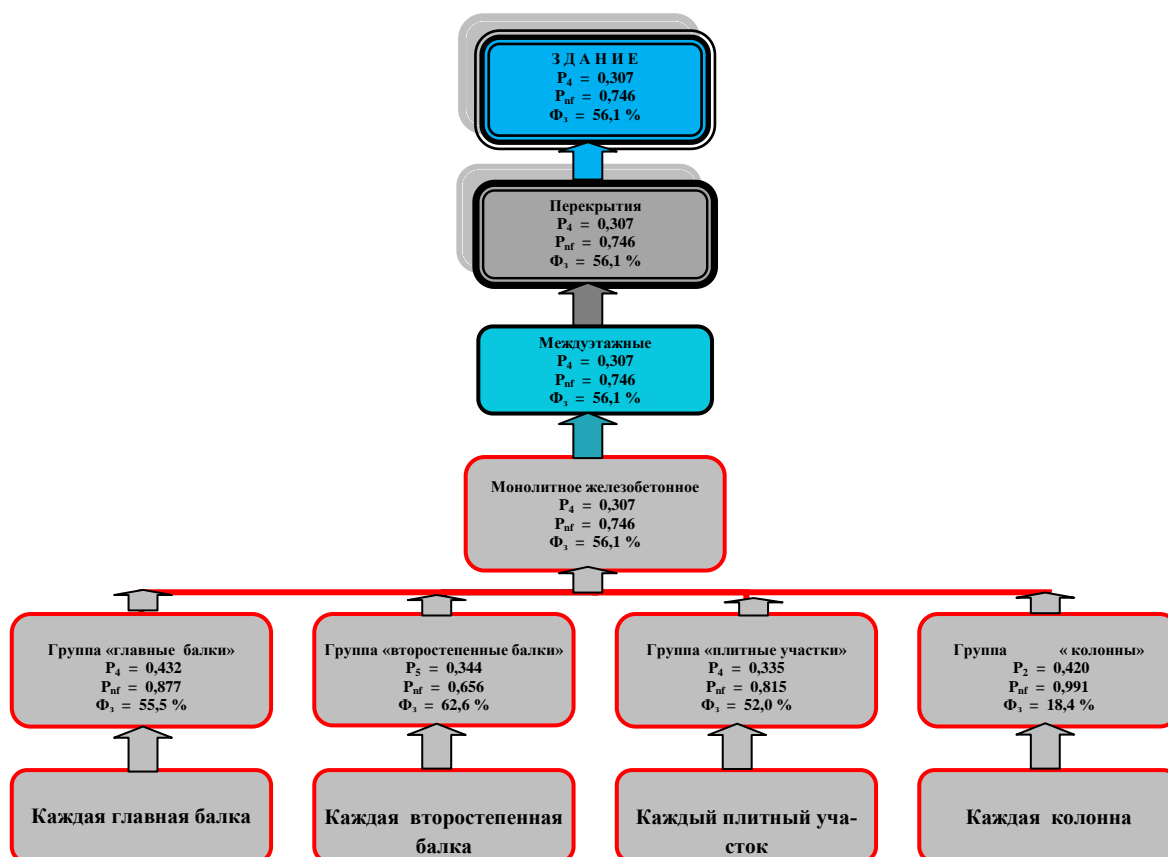


Рисунок 3 – Пример расчета вероятностей состояний, надежности и физического износа для элементов монолитного железобетонного перекрытия

групп элементов и всех подсистем всего здания. При этом предложенная уровневая иерархическая схема характеризуется тем, что выделенные в ней уровни диагностирования, различные для различных конструктивных подсистем, не являются строго иерархически соподчиненными. Это важно и означает, что нет необходимости обязательно проходить все уровни всех подсистем, чтобы выйти на вершину иерархии – здание в целом. Можно это делать по отдельности для каждой интересующей эксперта ветви. Для наглядности при демонстрации работы алгоритма и программного продукта «ВАТС» «диагностическое дерево» разделено на отдельные фрагменты – ветви, для элементов которых на соответствующих диаграммах вычисляются и анализируются получившиеся вероятностные параметры. Подробное описание программы «ВАТС» и численный пример представлены в приложениях.

8. Предложена основанная на статистике диагнозов методика расчета надежности элементов и здания в целом, в которой рассчитанная на каждом иерархическом уровне вероятность аварийного состояния трактуется как отказ конструктивного элемента, группы элементов, подсистем и системы в целом; таким образом, прохождение по «диагностическому дереву» в прямом направлении для каждого элемента каждого уровня дает вероятность безотказной работы (безотказность), как численную меру надежности.

В работе приведена методика расчета показателей надежности с использованием данных вероятностного анализа технического состояния конструктивных элементов здания. Она рассмотрена и продемонстрирована на примере полученных результатов диагностирования состояний главных балок монолитного железобетонного междуэтажного перекрытия. В основу построения методики расчета надежности положен принцип разделения и последующего комбинирования полученных по расчетам пяти вероятностей их состояний. Построение решения этой задачи состоит в том, что разделение вероятности состояний здесь выполнено по схеме «4 + 1». Последовательность представлена следующими действиями:

– выполняется разделение, а затем комбинирование пяти априорных вероятностей состояний, но по принципу 4 + 1, т. е.

$$P(S_{nf}) = P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) + P(S_4), \quad \text{а } P(S_f) = P(S_5). \quad (28)$$

– по такому же принципу разделяются и объединяются на каждом уровне получаемые в результате расчетов пять апостериорных вероятностей

$$P(S_{nf}/K^*) = P(S_1/K^*) + P(S_2/K^*) + P(S_3/K^*) + P(S_4/K^*), \quad \text{а } P(S_f/K^*) = P(S_5/K^*). \quad (29)$$

– принимается решение о том, что апостериорная вероятность пятого аварийного состояния $P(S_5/K^*)$, характеризующегося по определению исчерпанием несущей способности элемента, подсистемы, системы в целом, рассматривается как вероятность отказа $P(S_f/K^*)$. Вероятность состояния, которая обозначена $P(S_{nf}/K^*)$ и которая объединяет первые четыре вероятности состояний, в таком случае представляется, как вероятность безотказной работы.

В диссертации на диаграммах на этой основе проиллюстрирована процедура расчета надежности для всех ветвей «диагностического дерева» и приведены конкретные численные примеры реализации этой процедуры.

9. Предложенная вероятностная модель и реализованный на ее основе прямой ход диагностирования позволяют построить методику расчета физического износа на основе вероятностного подхода; такой подход создает предпосылки аргументированного обоснования необходимости разработки новой методики расчета физического износа и новых норм.

Для оценки возможности применения разработанного аппарата при выполнении расчетов физического износа предложено выполнить разделение и последующее комбинирование апостериорных вероятностей состояний, но по схеме «3 + 2». Принято решение физическим износом считать попадание каждого элемента структуры в четвертое и пятое состояния (предаварийное и аварийное), что никак не противоречит имеющемуся определению физического износа в нормах. Таким образом, под физическим износом предлагается считать сумму вероятностей этих состояний, выраженную в процентах. В работе приведены примеры, убедительно свидетельствующие о возможности такого подхода и целесообразности использовать его при разработке новых современных нормативных документов. В них при расчете физического износа предложено заменить стоимостную основу долевого «участия» каждого элемента в формировании технического (физического) состояния строительной системы (здания или сооружения) в целом, на долевого вклад, отражающий именно техническое (физическое) состояние каждого элемента. Этим долевым вкладом

предлагается считать информационную составляющую технического состояния в виде количества внесенной информации (остаточной энтропии) о состоянии, выраженного в вероятностной форме (вероятности степени определенности). Процедура расчета физического износа в диссертации также проиллюстрирована на соответствующих диаграммах. В таблице 1 приведен пример расчета вероятностей безотказной работы P_{nf} , физического износа и вероятностей состояний $P(S_i/K^*)$ для всего здания и его конструктивных подсистем.

Таблица 1 – Результаты расчетов (пример)

Подсистемы	P_{nf}	Физический износ, %	$P(S_i/K^*)$	Категория
1	2	3	4	5
Фундаменты	0,878	55,4	0,332	4
Наружные стены	0,941	52,3	0,464	4
Надподвальное перекрытие	0,673	70,6	0,379	4
Монолитное жб перекрытие	0,746	56,1	0,307	4
Сталедеревянное перекрытие	0,754	56,6	0,320	4
Чердачное перекрытие	0,641	71,8	0,359	5
Мауэрлат крыши	0,871	61,1	0,482	4
Элементы решетки	0,961	22,9	0,329	2
Стропильные балки	0,979	7,0	0,564	2
Кровельное покрытие	0,981	19,9	0,433	3
Здание в целом	0,824	43,8	0,262	4

10. Предложено рассмотреть обратный ход диагностирования (сверху вниз по «диагностическому дереву»), в рамках которого стало возможным выполнить процентное распределение долей информации о состояниях между всеми конструктивными элементами вероятностной иерархической структуры, что вполне может стать основой стоимостных расчетов, например, в методиках оценки недвижимости.

После реализации прямого хода диагностирования (он должен быть пройден обязательно) предложено рассмотреть процедуру прохождения иерархической структуры сверху вниз, т. е. в обратном направлении. В диссертации наглядно на диаграммах представлен результат этой процедуры. Представленное на диаграммах процентное распределение долей информации о состояниях между элементами вероятностной иерархической структуры вполне может дополнить полученную чисто техническую информацию о состоянии объекта еще и стоимостными параметрами.

Не исключено, что это доленое распределение вклада о состояниях может быть положено в основу проведения стоимостных расчетов в методиках оценки строительной части объектов недвижимости. Пример расчета для ветви «перекрытия» представлен на рисунке 4.

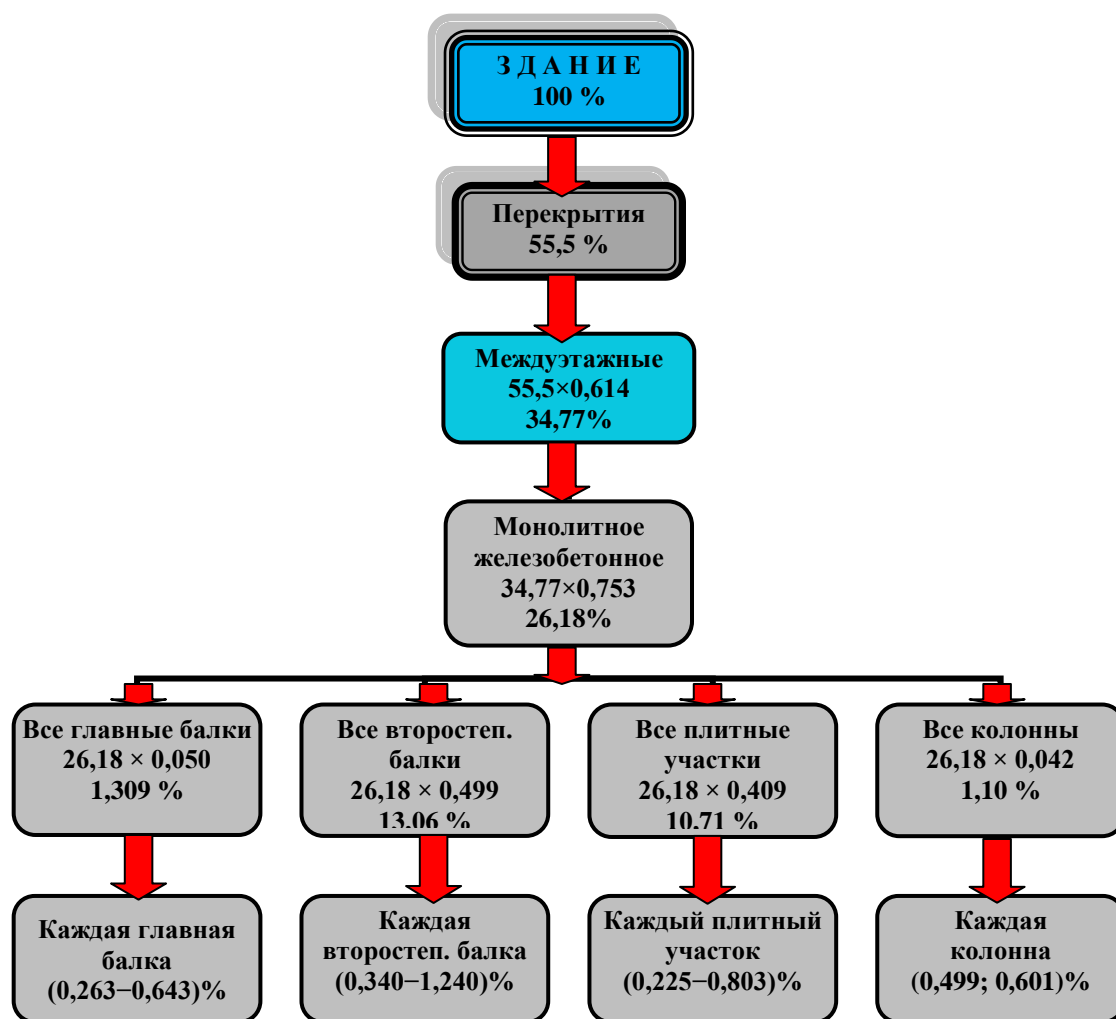


Рисунок 4 – Обратный ход. Пример расчета для элементов перекрытий

III ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Для решения задач по определению достоверной картины технического состояния, надежности и износа конструктивных элементов и здания в целом, а также для приведения в современный и согласованный вид существующей в обследовательской деятельности нормативной литературы, в диссертации впервые разработаны методы использования теоретического аппарата технической диагностики, основанного на вероятностно-статистических методах (методе Байеса, методах статистических решений) с включением в процедуру диагностирования необходимых понятий теории информации.

2. Введено понятие «состояния» и определено их количество. Приведены данные о многочисленных разночтениях в формулировании состояний и определении их количества, которые имеют место в различных литературных источниках. Предложено считать пять состояний минимальным количеством для таких сложных технических систем, как здания старой городской застройки.

3. Предложены конкретные мероприятия по приведению конструктивных элементов рассматриваемых зданий в исправное состояние. Мероприятия расписаны в зависимости от присвоенной категории. В таком конкретном виде

для каждого состояния каждого конструктивного элемента мероприятия предложены впервые.

4. Введено и сформулировано понятие диагностических матриц, которые участвуют в построении решения на основе уровневой формулировки задачи на самом «низшем» (базисном). Имея в виду важность прохождения базисного уровня, диагностические матрицы подвергаются всестороннему анализу на предмет выявления степени влияния входной в этот уровень статистической информации на «выход» из него. Рассмотрено несколько задач, результаты решения которых показали их устойчивость и информативность.

5. Предложена методика определения порогового значения для вероятностных параметров состояний. Минимальное приемлемое пороговое значение для назначения категорий технического состояния принято считать равным 0,690.

6. Для разработки моделей принятия решений о состояниях многоэлементной системы – здания в целом, построена графическая модель диагностирования в виде «диагностического дерева».

7. Результаты численного примера построения решения при выполнении многоуровневого вероятностного анализа технического состояния всех элементов, групп элементов и всех подсистем всего здания убедительно показали возможность предложенной методологии диагностирования. При этом предложенная уровневая иерархическая схема характеризуется тем, что уровни диагностирования не являются строго иерархически соподчиненными. Для проведения всех необходимых вычислений создан программный продукт «ВАТС».

8. После реализации прямого хода диагностирования предложено рассмотреть процедуру прохождения иерархической структуры сверху вниз, т. е. в обратном направлении. Наглядно на диаграммах представлен результат этой процедуры. Показанное на этих диаграммах процентное распределение долей информации о состояниях между элементами иерархической структуры свидетельствует о возможности дополнить полученную чисто техническую информацию о состоянии объекта еще и стоимостными параметрами.

9. Сформулировано основное понятие теории надежности «отказ» применительно к зданиям старой городской застройки и обсуждены классификация и особенности определения этого понятия. Отмечено, что для этих зданий накопился значительный материал по статистике диагнозов, который в данной работе упорядочен и уложен в рамки разработанных методик аппарата технической диагностики и теории информации.

10. В основу построения методики расчета надежности положен принцип разделения априорных и апостериорных вероятностей пяти состояний по схеме «4 + 1». На этой основе принято решение считать вероятность отказа, равной апостериорной вероятности пятого аварийного состояния.

11. Предложенная вероятностная модель позволила также построить методику расчета физического износа. Принято решение физическим износом считать сумму вероятностей двух последних состояний (4 и 5), выраженную в процентах.

12. Приведены примеры расчета физического износа. Предложено заменить стоимостную основу долевого «участия» элемента в формировании технического состояния строительной системы на долевой вклад, отражающий именно техническое состояние каждого элемента. Этим долевым вкладом принято считать количество внесенной информации (остаточной энтропии), выраженной в вероятностной форме.

IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Соколов, В.А.** Диагностический вес признаков и диагностическая ценность обследования при распознавании состояний элементов строительных систем [Текст] / В.А. Соколов // Инженерно-строительный журнал, № 3. – СПбПУ, 2010. – С. 27-31 (0,31 п.л.).

2. **Соколов, В.А.** Вероятностный метод оценки технического состояния конструкций железобетонного монолитного перекрытия зданий старой городской застройки [Текст] / В.А. Соколов // Инженерно-строительный журнал, № 4. – СПбПУ, 2010. – С. 49-58 (0,625 п.л.).

3. **Соколов, В.А.** Диагностика технического состояния конструкций зданий и сооружений с использованием методов теории нечетких множеств [Текст] / В.А. Соколов // Инженерно-строительный журнал, № 5. – СПбПУ, 2010. – С. 31-37 (0,5 п.л.).

4. **Соколов, В.А.** Построение решения для оценки технического состояния конструктивных систем зданий и сооружений с использованием вероятностных методов распознавания [Текст] / В.А. Соколов // Инженерно-строительный журнал, № 6. – СПбПУ, 2010. – С. 48-57 (0,625 п.л.).

5. **Соколов, В.А.** Оценка технического состояния строительных конструкций зданий на основе многоуровневого вероятностного анализа [Текст] / В.А. Соколов // Инженерно-строительный журнал, № 7. – СПбПУ, 2011. – С. 45-51 (0,44 п.л.).

6. **Соколов, В.А.** Интервальные методы в байесовском подходе при диагностировании технического состояния строительных конструкций зданий [Текст] / В.А. Соколов // Научно-технические ведомости СПбПУ, № 4 (135). – СПб, 2011. – С. 227-235 (0,56 п.л.).

7. **Соколов, В.А.** Инженерно-диагностическое обследование строительных объектов Северо-Западной ТЭЦ [Текст] / В.А. Соколов, В.А. Мишаков, Л.Н. Синяков, Д.А. Страхов // Научно-технические ведомости СПбПУ, № 2 (147), том 2. – СПб, 2012. – С. 282-287 (0,375 п.л./0,125 п.л.).

8. **Соколов, В.А.** Методы статистических решений для распознавания состояний конструкций монолитных железобетонных перекрытий [Текст] / В.А. Соколов // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, том 269, СПб. – 2012, С. 10-16 (0,44 п.л.).

9. **Соколов, В.А.** Расчет сооружений башенного типа на динамические воздействия с учетом податливости свайного фундамента и основания [Текст] /

В.А. Соколов, Л.Н. Синяков, Д.А. Страхов // Инженерно-строительный журнал, № 4. – СПбПУ, 2013. – С. 46-50 (0,33 п.л./0,13 п.л.).

10. **Соколов, В.А.** О пороговом значении при определении вероятностей состояний строительных конструкций [Текст] / В.А. Соколов // Вестник гражданских инженеров, № 4. – СПбГАСУ, 2013. – С. 67-73 (0,44 п.л.).

11. **Соколов, В.А.** Оценка технического состояния и надежности строительных конструкций на основе вероятностных методов технической диагностики [Текст] / В.А. Соколов // Электронный журнал «Современные проблемы науки и образования» № 6, Москва. – 2013; URL: <http://www.scienceeducation.ru/113-11552>.

12. **Соколов, В.А.** Оценка технического состояния и физического износа строительных конструкций с использованием вероятностных методов технической диагностики [Текст] / В.А. Соколов // Известия вузов, №1. НГАСУ (Сибстрин), 2014. – С. 94-100 (0,44 п.л.).

13. **Соколов, В.А.** Категории технического состояния строительных конструкций зданий при их диагностике вероятностными методами [Текст] / В.А. Соколов // Журнал "Фундаментальные исследования", № 6 (часть 6), 2014. – С. 1159-1164 (0,375 п.л.).

14. **Sokolov, V.A.** Probabilistic Analysis of Intermediate Floor Steel and Wooden Structures in the Old Urban Development Building [Text] (2014) Applied Mechanics and Materials, vol. 633 – 634, pp. 1140-1147 (0,50 п.л.).

15. **Соколов, В.А.** Оценка технического состояния фундаментов зданий старой городской застройки с использованием вероятностных методов распознавания [Текст] / В.А. Соколов // Журнал "Фундаментальные исследования", № 2 (часть 8), 2015. – С. 1652-1657 (0,375 п.л.).

16. **Соколов, В.А.** Вероятностный анализ технического состояния кирпичных стен зданий старой городской застройки [Текст] / В.А. Соколов // Журнал "Строительство и реконструкция", № 1 (57), Госуниверситет – УНПК, Орел. – 2015. – С. 65-73 (0,56 п.л.).

Публикации в других изданиях:

17. **Соколов, В.А.** Комплексные инженерно-диагностические исследования Новгородского Кремля [Текст] / В.А. Соколов, П.А. Гарибин // Всероссийская научная конференция «Задачи инженерной геологии в реставрации и сохранении памятников истории и культуры». Сборник тр. – Рязань, 1993. – С. 40-44 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

18. **Соколов, В.А.** Методология оценки эксплуатационной надежности зданий и сооружений исторических территорий (системный подход) [Текст] / В.А. Соколов, Е.Л. Свешников, П.А. Гарибин // Научно-практическая конференция по вопросам реставрации «Памяти Г. М. Штендера». Тезисы докладов – Новгород, 1993. – С. 15-18 (0,25 п.л./0,13 п.л.).

19. **Соколов, В.А.** Применение статистических методов в прогнозировании ресурса строительных конструкций [Текст] / В.А. Соколов // IV Международная конференция «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности

и долговечности конструкций и методы их решения». Труды. – СПб, 2001. – С. 278-279 (0,06 п.л.).

20. **Соколов, В.А.** Современный инженерный подход к вопросам сохранения и реконструкции исторических зданий и сооружений Санкт-Петербурга [Текст] / В.А. Соколов, В.И. Козловский, В.А. Мишаков, Л.Н. Синяков // Реконструкция исторических городов и геотехническое строительство. Сборник статей международной конференции в честь 300-летия СПб. – СПб, 2003. – С. 67-71 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

21. **Соколов, В.А.** Комплексный научно-технический подход к вопросам сохранения и реконструкции исторических зданий и сооружений Санкт-Петербурга [Текст] / В.А. Соколов, М.Н. Лебедев, В.А. Мишаков, Л.Н. Синяков // V Международная конференция «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения», СПбПУ. – СПб, 2003. – С. 272-279 (0,5 п.л./0,13 п.л.).

22. **Соколов, В.А.** Обследование состояния жилого здания на Двинской улице в Санкт-Петербурге [Текст] / В.А. Соколов, В.А. Мишаков, Л.Н. Синяков, Д.А. Страхов // Международная конференция по геотехнике. Сборник статей. – СПб, 2004. – С. 57-64 (0,5 п.л./0,13 п.л.).

23. **Соколов, В.А.** Вероятностный анализ технического состояния (ВАТС) зданий и сооружений [Текст] / В.А. Соколов // Современные металлические и деревянные конструкции / Сборник научных трудов Международного симпозиума. – Брест, 2009. – С. 289-294 (0,375 п.л.).

24. **Соколов, В.А.** Применение вероятностных методов для оценки технического состояния железобетонных балок [Текст] / В.А. Соколов // Проблемы современного бетона и железобетона. Сборник трудов Второго Международного симпозиума, ч.1. – Минск, 2009. – С. 399-408 (0,625 п.л.).

25. **Соколов, В.А.** Определение технического состояния зданий и сооружений с применением вероятностных методов распознавания [Текст] / В.А. Соколов // Научные исследования и инновационная деятельность / Материалы научно-практической конференции СПбПУ. – СПб, 2009. – С. 156-164 (0,56 п.л.).

26. **Соколов, В.А.** Определение категорий технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений с использованием вероятностных методов распознавания [Текст] / В.А. Соколов // Предотвращение аварий зданий и сооружений. Сборник научных трудов IV Международной конференции. – Москва, 2010. – С. 375-387 (0,75 п.л.).

27. **Соколов, В.А.** Вероятностный анализ технического состояния (ВАТС) элементов строительных систем [Текст] / В.А. Соколов // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций. Сборник трудов XIV научно-методической конференции. – СПб, ВИТУ, 2010. – С. 41-49 (0,56 п.л.).

28. **Соколов, В.А.** Вероятностный анализ технического состояния (ВАТС) конструкций железобетонного монолитного перекрытия промышленного здания старой городской застройки [Текст] / В.А. Соколов // Журнал «ВІСНИК Одеської Державної академії будівництва та архітектури». Випуск №37. – Одесса, 2010. – С. 329-342 (0,875 п.л.).

29. **Соколов, В.А.** Вероятностный анализ технического состояния конструкций зданий старой городской застройки [Текст] / В.А. Соколов // Сборник трудов Международного симпозиума «Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс», №14, часть 1. – ОГАСА, Одесса, 2010. – С. 67-71 (0,25 п.л.).

30. **Соколов, В.А.** Вероятностный метод оценки технического состояния конструкций железобетонного монолитного перекрытия зданий старой городской застройки [Текст] / В.А. Соколов // Сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Архангельск, 2010. – С. 336-352 (1,06 п.л.).

31. **Соколов, В.А.** Вероятностный анализ и определение категорий технического состояния конструкций междуэтажного перекрытия здания старой городской застройки [Текст] / В.А. Соколов // «Научные исследования и инновационная деятельность». Материалы научно-практической конференции. – СПбПУ, 2010, С. 125-135 (0,69 п.л.).

32. **Соколов, В.А.** Оценка технического состояния элементов строительных систем с использованием вероятностных методов распознавания [Текст] / В.А. Соколов // Научный электронный журнал «Наука и безопасность», №1, 2011.

33. **Соколов, В.А.** Многоуровневый вероятностный анализ технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений [Текст] / В.А. Соколов // Материалы XV научно-методической конференции ВИТИ «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций». – СПб, 2011. – С. 54-63 (0,625 п.л.).

34. **Соколов, В.А.** Определение технического состояния строительных конструкций зданий на основе многоуровневого вероятностного анализа [Текст] / В.А. Соколов // Научный электронный журнал «Предотвращение аварий зданий и сооружений». – М., 2012.

35. **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 (9,5 п.л./9,0 п.л.).

36. **Соколов, В.А.** Статистические методы технической диагностики при распознавании состояний строительных конструкций зданий [Текст] / В.А. Соколов // Academic science – problems and achievements III. Vol 1. Сборник научных трудов – Create Space 4900 La Cross Road, North Charleston, SC USA 29406, 2014. – С. 142-145 (0,2 п.л.).