

МЕРКУЛОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МЕТОДИКА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ
МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ В УСЛОВИЯХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Научная специальность

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в инженерной академии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН)

Научный руководитель: Разумный Юрий Николаевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
механики и процессов управления инженерной академии
РУДН

Официальные оппоненты: Галишникова Вера Владимировна
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
строительной и теоретической механики института
промышленного и гражданского строительства ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет»

Садовникова Наталья Петровна
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
«Цифровые технологии в урбанистике, архитектуре и
строительстве» института архитектуры и строительства
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический
университет»

Петров Андрей Владимирович
кандидат технических наук, советник по научным
исследованиям и разработкам ООО «МОНИТОР СОФТ»

Защита диссертации состоится 29.12.2025 в 11:00 на заседании диссертационного совета
ПДС 2022.016 по адресу: 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке РУДН по адресу: 117198,
г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Объявление о защите и автореферат диссертации размещены на сайтах
<http://vak2.ed.gov.ru/> и <https://www.rudn.ru/science/dissovet>

Автореферат разослан 27.11.2025.

Ученый секретарь диссертационного совета ПДС 2022.016
кандидат технических наук

О.Е. Самусенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Инженерно-технические решения и управленческие действия, основанные на глубоком эвристическом опыте и экспертных знаниях, играют решающую роль в создании безопасных, эффективных и устойчивых строительных сооружений. Таким образом, автоматизация поддержки принятия решений при проектировании жилого многоквартирного здания способствует развитию жилищной инфраструктуры и улучшению качества и инвестиционной привлекательности строительных объектов. Это особенно актуально в связи с развитием методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые применяют для определения перспективных территорий для жилой застройки.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время искусственный интеллект (ИИ) и информационное моделирование проникают во все этапы жизненного цикла зданий. Важными остаются смежные вопросы организации систем электроснабжения в многоквартирных домах, поддержки принятия решений для управления рисками и инвестициями в строительство. Интерес к использованию новых возможностей программного обеспечения для строительных инноваций по данным Росстата продолжает расти.

Экспертные системы (ЭС) являются направлением и инструментом ИИ и могут применяться как системы поддержки принятия инженерных решений. Их, в частности, используют при автоматизации, анализе и предоставлении рекомендаций для решения профильных инженерных задач в строительстве.

Как следует из анализа литературы, значительная часть экспертных систем для задач строительства основаны на математическом аппарате нечёткой логики и теории нечётких множеств. Инструментарий нечёткой логики является одним из приоритетных в решении задач разработки информационных технологий и интегрированных экспертных систем. В частности, в работе Е. Энса (2020) описана возможность принятия управленческих решений в бизнес-среде на основе методов нечёткой логики.

В ряде работ (Г. Кашеварова и др., Г. Шмелев, Ю. Колотилов, С. Маслов) предложены экспертные системы на основе нечеткой логики для диагностики и оценки качества и остаточного срока службы инженерных конструкций строительных объектов.

В работе Л. Надбережного и Л. Гулякина представлен обзор экспертных систем в строительной сфере.

Интеллектуальные технологии играют важную роль в обследовании строительных конструкций и дефектоскопии зданий и сооружений (Г. Кашеварова, К. Дроздов). Кроме того, эти системы внедряются для повышения эффективности обслуживания инженерных коммуникаций. В работе А. Коргина и М. Емельянова рассматривается построение интеллектуальной системы автоматического мониторинга технического состояния строительных конструкций для определения состояния объектов с использованием комплекса конечно-элементного расчёта для прогнозирования технического состояния конструкций, находящихся в процессе строительства. Экспертные системы в проектировании и управлении строительством рассмотрены в монографии А. Гусакова и соавторов. Для управления разработкой стандарта по критерию допустимого риска П. Серенковым была разработана соответствующая экспертная система.

Наблюдается рост числа публикаций, которые посвящены разработке и применению экспертных систем для задач строительства. Значительное число публикаций по теме исследования представлено в иностранной литературе, где отмечена важная роль нечёткой логики и машинного обучения во многих приложениях строительной техники и управления.

Следует отметить, что наборы данных, собранные из разрозненных систем, могут использоваться для поддержки принятия обоснованных решений в изолированных и рассредоточенных частях производственного процесса. При разработке экспертных систем как метода искусственного интеллекта используются принципы системного программирования.

Таким образом, анализ литературы показывает, что существующие в настоящее время интеллектуальные информационные ресурсы не позволяют в полной мере поддерживать решения на стадии подготовки к строительству.

Цель исследования – повышение эффективности принимаемых решений по определению проектных характеристик проектных характеристик многоквартирных жилых домов на стадии

подготовки к строительству на основе использования интеллектуальных экспертных систем.

Задачи исследования:

1. разработка математических принципов определения инженерной концепции многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству, включая определение проектных характеристик, архитектуру базы знаний и разработку обобщённого алгоритма функционирования экспертной системы;
2. решение задачи параметрической оптимизации технического облика многоквартирных жилых домов, включая идентификацию функций принадлежности и установление логических взаимосвязей между проектными характеристиками с обоснованием выбора полученных решений и анализом взаимозависимости входных и выходных параметров;
3. разработка математических моделей расчёта инвестиционной привлекательности (в т.ч. с учётом данных ДЗЗ), параметров инсоляции, количества лифтов и других проектных характеристик многоквартирных жилых домов;
4. разработка прототипа программной реализации экспертной системы с графическим пользовательским интерфейсом на языке программирования высокого уровня;
5. анализ работы экспертной системы и тестовые испытания в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений.

Методология и методы исследования

В работе получили развитие инструменты параметрического моделирования, сценарии предварительной обработки данных и модели глубоких нейронных сетей. При разработке экспертных систем в качестве математической базы использовался аппарат нечёткой логики, позволяющий точно рассчитывать требуемые числовые параметры для построения модели. При разработке систем искусственного интеллекта на базе нечеткой логики использован алгоритм Мамдани, позволяющий создать интерпретируемую и расширяемую базу экспертных знаний.

Научная новизна исследования заключается в постановке задачи разработки экспертной системы определения проектных характеристик многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству с использованием математического аппарата, который детализируется до алгоритмов и реализован в виде набора прикладных программных инструментов поддержки принятия инженерных решений. Впервые был применён аппарат нечёткого логического вывода в архитектуре многопрофильной экспертной системы, включающий подсистемы расчёта инвестиционной привлекательности, количества лифтов и других проектных характеристик многоквартирных жилых домов индивидуального жилищного строительства и малоэтажного жилищного строительства на этапе подготовки к строительству. Было разработано 13 специализированных экспертных модулей в рамках общей экспертной системы. Разработка способствует автоматизации получения численных решений, сбору и хранению экспертных знаний, а также повышению эффективности процессов проектирования и управления строительством.

Теоретическая значимость состоит в разработке математических методов решения задачи определения проектных характеристик многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству и обусловлена организацией архитектуры экспертной системы, объединяющей экспертные знания, учитывающие различные аспекты строительства, включая экономический и инженерно-технический анализ.

Практическая значимость состоит в доведении математического аппарата до прототипа научного программного обеспечения, которое предназначено для решения расчётных задач проектирования многоквартирных жилых домов. Разработанная экспертно-аналитическая система обеспечивает поддержку принятия решений с возможностью интерпретации результатов на основе инструментария нечёткого логического вывода, что способствует принятию рациональных и обоснованных решений.

Объект исследования – методы разработки интеллектуальных экспертных систем поддержки принятия решений в области строительства.

Предмет исследования – применение алгоритмов логического вывода для создания специализированных экспертных систем по определению проектных характеристик многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству.

Степень достоверности и апробация результатов

Использованный в работе математический аппарат нечеткой логики хорошо разработан, и позволяет точно рассчитывать требуемые числовые параметры при построении моделей.

Приняты для построения для построения экспертной информационной системы алгоритм Мамдани является одним из наиболее распространённых и интуитивно понятных методов в нечёткой логике для систем поддержки принятия решений на основе исчисления правил и эффективно адаптирован под структуру и специфику строительной предметной области. Результаты, полученные в работе, хорошо согласуются с результатами, представленными в независимых источниках по этой теме. Результаты работы докладывались и получили положительные оценки на научно-технических мероприятиях РУДН.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика проектирования экспертной системы определения проектных характеристик многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству, основанная на итерационной процедуре сбора информации из различных источников, включая ГОСТы, СНИПы, СанПиНы, данные ДЗЗ, научно-методическую литературу, опросы экспертов с формализацией собранных знаний в специализированной базе знаний.

2. Интеллектуальная экспертная система поддержки принятия решений при проектировании многоквартирных домов, имеющая многомодульную архитектуру, состоящая из специализированных экспертных подсистем и системы управления базой знаний, реализованной на основе нечёткого алгоритма логического вывода Мамдани.

3. Экспертные модули, имеющие индивидуальные алгоритмы дефаззификации для гибкой настройки выходных значений экспертной системы, в том числе: по элементу с наибольшей степенью принадлежности – 4 модуля, по геометрической середине множества – 1 модуль, по элементу с наименьшей степенью принадлежности – 2 модуля, по центру тяжести – 6 модулей.

4. Система поддержки принятия решений при посадке объекта капитального строительства на земельный участок, основанная на разработанных модулях расчёта количества этажей, количества лифтов и определения ориентации здания по сторонам света.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту, приведён список публикаций и сведения об апробации работы.

В первой главе произведён обзор современного состояния проблемы, дана постановка задачи определения технического облика и проектных характеристик многоквартирных жилых домов на стадии подготовки к строительству и общий методический принцип и её решения.

Отмечено, что для совершенствования методов и средств, используемых для определения проектных характеристик многоквартирных жилых домов на стадии подготовки к строительству, целесообразно применение методов искусственного интеллекта. Экспертные системы (ЭС) — программные комплексы, содержащие экспертные знания специалистов в определённых предметных областях и служат для тиражирования экспертных знаний и опыта при создании систем искусственного интеллекта (Д.А. Поспелов, 1996). Речь идёт о разработке прототипов интеллектуальных алгоритмов и методов поддержки принятия инвестиционных решений, функционирующих на основании экспертных знаний для оценки строительных проектов, планируемых к строительству как в рамках существующей инфраструктуры, так и в процессе освоения новых территорий при реализации государственных программ «Дальневосточный гектар» и «Арктический гектар».

Модель многокритериального анализа принятия решений должна учитывать основные элементы, определяющие соответствие объекта строительства поставленным целям и задачам с учётом ограничений, накладываемых на строительный объект (стоимость, параметры участка постройки и др.), а также доступных ресурсов (финансовые, материальные, технические и т.д.).

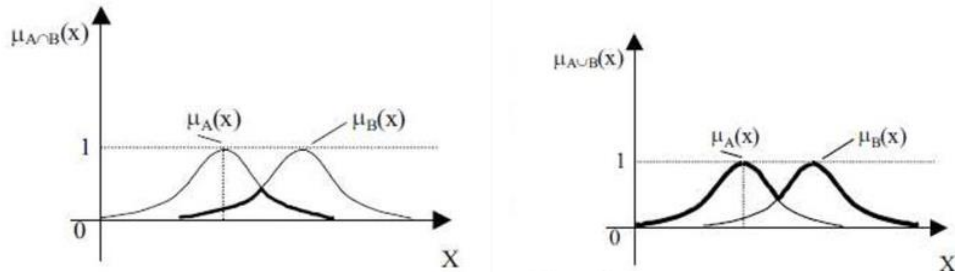
Задача определения технического облика многоквартирного жилого дома решается с помощью структурной и параметрической оптимизации. Структурная оптимизация заключается в определении состава и взаимосвязи элементов проектируемого объекта строительства, а параметрическая — в выборе значений его параметров. Применительно к решаемой задаче структурная оптимизация включает определение следующих характеристик: число лифтов, высота здания (количество этажей) многоквартирного жилого дома, ориентирование дома по сторонам света, определение индекса привлекательности строительства на основе параметров инженерных коммуникаций, а также определение инвестиционной привлекательности многоквартирного жилого здания с учётом данных ДЗЗ (Разумный Ю.Н., 2019), а также экономических факторов.

Инструментарием решения задачи определения проектных характеристик многоквартирных жилых домов на стадии подготовки к строительству являются методы инженерии знаний как набор методов и средств приобретения и формализации знаний (Карась С.И., Аржаник М.Б., 2025). ЭС являются системами поддержки принятия решений (СППР), которые создают в результате идентификации, концептуализации и формализации знаний, полученных в результате опросов экспертов, сбора информации из различных источников, включая нормативную документацию ГОСТы и др.

Всесторонний анализ литературы показал, что значительная часть экспертных систем, используемых в задачах строительства зданий основана на математическом аппарате нечёткой логики (Заде Л.А., 1996). Использование нечёткой логики при создании экспертных систем для задач проектирования строительства позволяет учитывать нелинейные зависимости между переменными и использовать вероятностные модели для поддержки принятия решений. Это особенно полезно для снижения вероятности ошибок и в ситуациях, где информация ограничена или неоднозначна (загруженность лифтов, освещённость, климатические условия и пр.).

Во второй главе разработаны основные положения анализа и применения экспертных решений по определению технического облика и проектных характеристик многоквартирных жилых домов на стадии подготовки к строительству. Установлены основные соотношения между проектными характеристиками многоквартирных домов и проанализированы нормативные документы, регламентирующие требования, оказывающие влияние на характеристики проектного облика многоквартирных жилых домов. Проанализированы методы машинного обучения и методы экспертных систем (Шевцов Е.С., Шамин Р.В., 2025). Проведён сравнительный

анализ алгоритмов нечёткого логического вывода и сделан вывод, о том, что для создания экспертной системы целесообразно использовать алгоритм Мамдани, так как он адаптирован под структуру базы знаний, подходящей для формализации описания задач строительной области (Демидова Г. Л., Лукичев Д. В., 2025). Операция объединения ($A \cup B$) нечётких множеств (рис. 1а) позволяет объединить два или более нечётких множества в одно и определяется как максимум функций принадлежности элементов в этих множествах. Пересечение нечётких множеств



(рис. 1б) позволяет найти общие элементы между двумя или более нечёткими множествами. Результатом операции пересечения ($A \cap B$) является новое нечёткое множество.

(а) (б)

Рис. 1. Операции над нечёткими множествами: объединение (а) и пересечение (б)

Базу знаний составляют правила, которые описывают логические связи между входными и выходными переменными в терминах "если-то". Формальное представление базы знаний ЭС в виде набора правил:

правило 1. Если «условие 1» и «условие 2» → «следствие 1»,

...

правило i. Если «условие i» и «условие i», → «следствие i».

Система логического вывода Мамдани (Круглов В.В., 2001, Болдырев В.В., 2021) использует функции принадлежности для выражения нечётких правил и логических связей между входами и выходами в соответствии со схемой, приведённой на рис. 2. Алгоритм Мамдани представляет собой следующую последовательность шагов.

1. Получение исходных значений, представляющих численные значения из заданного диапазона входных переменных.

2. Приведение полученных числовых значений к нечёткости (фаззификация).

3. Агрегация предусловий правил

$$T(k \wedge l) = \min\{T(k), T(l)\},$$

где k и l – нечеткие функции принадлежности.

4. Нахождение степени истинности заключений системы правил (активизация):

$$r'(y) = \min\{c_i, r(y)\},$$

где: c_i – степень истинности i -го следствия, $r(y)$ – функция принадлежности терма.

5. Дефаззификация полученного нечёткого значения.

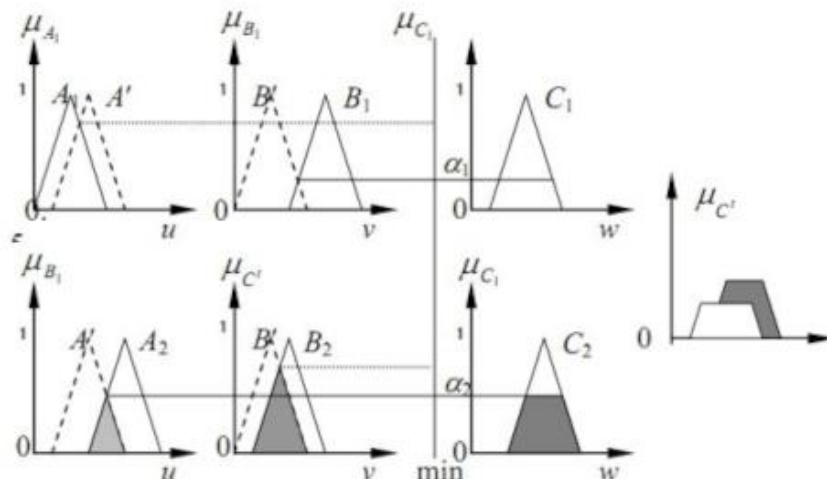


Рис. 2. Агрегация логического вывода методом Mamdani

Дефаззификация – функция преобразования нечёткого множества в точное числовое значение. Рассмотрены методы дефаззификации нечётких множеств, примеры которых представлены на рис. 3-5. Основные виды дефаззификации: центр тяжести (center of gravity, CoG, centroid), метод максимума (max-min method), метод взвешенного среднего (weighted average), метод квази-среднего (modified center of sums, MCS), метод среднего максимума (middle of maxima, MoM), наибольший максимум (largest of maxima, LoM), наименьший максимум (smallest of maxima, SoM) и геометрическая середина множества (bisector). Метод центра тяжести рассчитывается:

$$out = \frac{\int_{min}^{max} x r(x) dx}{\int_{min}^{max} r(x) dx},$$

где out – результат функции дефаззификации; x – выходная лингвистическая переменная; $r(x)$ – степень принадлежности, которая определяется на этапе активации; min и max – минимальное и максимальные значения интервала выходной переменной.

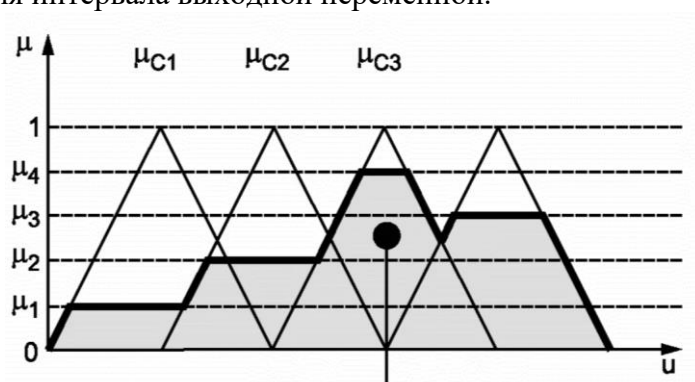


Рис. 3. Центр тяжести (CoG): ox – значения переменной u , oy – степень принадлежности

Определены характеристики программного обеспечения и описана организация программного кода, предусматривающая возможность расширения базы знаний за счёт унифицированных методов программного синтаксиса для описания знаний в ЭС.

Визуализация трёхмерных проекций поверхностей отклика позволяет определить взаимосвязи между входными переменными и результатами работы экспертной системы и выработать рекомендации по настройке функционирования, включая подбор методов дефаззификации, форм функций принадлежности и структуры правил логического вывода.

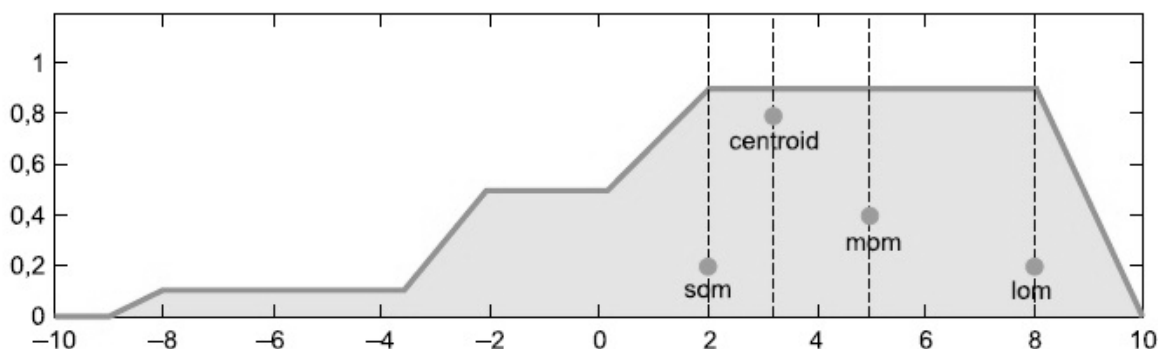


Рис. 4. Иллюстрация к методам дефаззификации: ox – значения переменной, oy – степень принадлежности

В архитектуре программного обеспечения каждый разработанный программный модуль экспертной системы имеет индивидуальный алгоритм дефаззификации, что позволяет гибко настраивать систему логического вывода по сравнению с подходом, в котором все правила сосредоточены в единой базе знаний.

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{\max}(x_i)}{N}$$

$$x^* = \frac{(a+b)}{2}$$

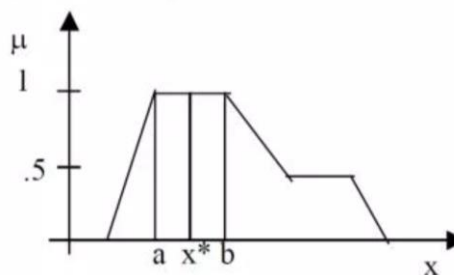


Рис. 5. Средний максимум: ox – значения переменной, oy – степень принадлежности

Экспертный модуль трафик-анализа для подбора количества лифтов в жилой комплекс учитывает следующие параметры: «наибольшая поэтажная площадь квартир», m^2 , «общая грузоподъемность», кг, «скорость», м/с., «этажность», число этажей. Математическая модель посадки жилых зданий на заданном земельном участке включает подсистемы оценки количества этажей для посадки объекта (многоквартирные жилые дома, смешанная жилая застройка для жилых районов, многоквартирные жилые дома, смешанная жилая застройка для кварталов, блокированные жилые дома для кварталов, блокированные жилые дома для жилых районов), а также систему ориентирования здания по сторонам света, параметрам инсоляции и географической широты строительного объекта. При создании рекомендаций по посадке зданий были учтены нормы инсоляции, которые позволяют принимать решения по ориентированию здания (руководящий нормативный документ – СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»). Расчёт возможных направлений оси окна (в градусах) в зависимости от параметров инсоляции при посадке здания учитывает следующие параметры:

- «среднегодовая инсоляция», час / сут.,
- «географическая широта», град.,
- «количество комнат», шт.

Экспертный модуль анализа и сопоставления градостроительных и проектных характеристик земельного участка, рассматриваемого для покупки под застройку, состоит из четырёх подсистем, которые могут использоваться как для подбора вариантов зданий для конкретного земельного участка, так для оценки соответствия выбранного здания градостроительным и проектным нормам. Разработанный модуль расчёта количества этажей в доме предусматривает:

- многоквартирные жилые дома, смешанная жилая застройка для жилых районов,
- многоквартирные жилые дома, смешанная жилая застройка для кварталов,
- блокированные жилые дома, для кварталов,
- блокированные жилые дома, для жилых районов.

Примеры разработанных и используемых в ЭС функций принадлежности приведены на рис. 6-7.

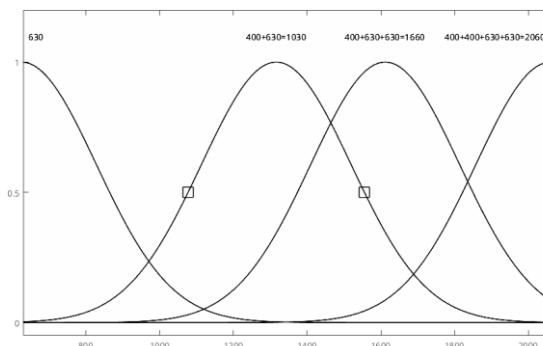


Рис. 6. Функции принадлежности входной лингвистической переменной «направление оси окна», град.

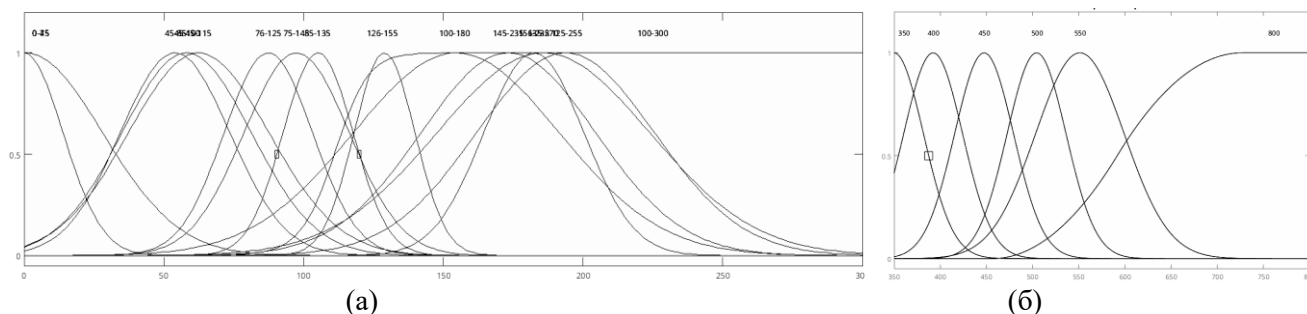


Рис. 7. Функции принадлежности входной лингвистической переменной «наибольшая поэтажная площадь квартир», м² (а) и «общая грузоподъёмность», кг (б)

Экспертный модуль расчёта износа конструкций и определения категории состояния зданий по результатам предварительного обследования основана на ГОСТ 31937-2011, где выделяется четыре категории технического состояния несущих конструкций (состояния сооружения). Описание данных категорий описано в таблице Д1 СП 22.13330.2016, откуда, опираясь на экспертную информацию о размерах трещин и других численных параметрах, были получены правила вывода. Экспертный модуль расчёта процента износа конструкций и определения категории состояния зданий учитывает следующие параметры:

- «дефекты в каменной кладке несущих стен, колонн», см,
- «дефекты в ЖБ конструкциях», %,
- «ширина раскрытия трещин в наружных стенах», мм,
- «сдвиги и трещины в перекрытиях», см.
- «процент износа конструкций (по категориям)», %.

Экспертный модуль оценки инвестиционной привлекательности жилых многоквартирных комплексов позволяет произвести оценку инвестиционной привлекательности на стадии подготовки к строительству и учитывает следующие параметры:

- «количество квартир в доме», шт.
- «количество квартир на этаже», шт.
- «средняя площадь квартиры», м²
- «средняя площадь комнаты», м²
- «средняя площадь кухни», м²
- «высота потолков», м².

В качестве экспертной информации для построения базы знаний экспертного модуля по оценке инвестиционной привлекательности были использованы рекомендательные данные о классификации типов жилья краснодарской строительной компании. Модель рассчитывает значение инвестиционной привлекательности в миллионах рублей. Поскольку цены на строительство имеют тенденцию меняться во времени, в экспертных модулях целесообразно использовать поправочные коэффициенты вместо денежных сумм с привязкой к рублям. База знаний и форма лингвистических переменных при этом не изменяются, достаточно задать соответствующий диапазон значений коэффициента, чтобы результаты вычислений были скорректированы с учётом коррекции финансовых моделей.

Разработан индекс привлекательности строительства жилого многоэтажного здания в зависимости от его высоты и площади. Входными переменными являются высота здания (от 15 м) и площадь здания (до 550 кв.м и более 550 кв.м). Выходной параметр: себестоимость строительства за метр квадратный жилья. С позиции экономики в экспертном модуле можно ввести коэффициент удорожания без привязки к конкретной расчётной стоимости.

Разработана система оценки индекса рентабельности инвестиций в строительство, учитывающая динамику строительства в заданном регионе по данным ДЗЗ и макроэкономические факторы региона. Для оценки инвестиционных рисков в строительстве объектов жилой недвижимости в существующей инфраструктуре разработана система, которая по данным ДЗЗ анализирует динамику строительных работ на интересующей территории и опирается на отношение общей площади, где находятся строящиеся объекты к электроосвещенной части в ночное время. Кроме того, в экспертном модуле используется оценка активности портов, станций и вокзалов.

Также были разработаны методы оценки рентабельности инвестиций в многоэтажное жилое строительство в городах и населённых пунктах рядом с дорожно-транспортной инфраструктурой на основе соотношения общей площади и интенсивности засветки дорог и дорожных сетей в ночное и дневное время. Кроме того, были разработаны методы оценки инвестиционных рисков на основе данных климатических и геофизических факторов, полученных в результате мониторинга средствами ДЗЗ (Сибирь, Дальний восток, Арктика), а также факторов, учитывающих относительную площадь болот и торфяников, интенсивность пожаров, подтопляемость территорий от разливов рек и наводнений, сейсмическую активность.

Проведён анализ взаимозависимости характеристик технического облика проектных характеристик и инженерной концепции многоэтажных жилых зданий на основе экспертных оценок. В результате проведённых исследований были подобраны функции принадлежности с учётом экспертных знаний о каждой предметной области.

В результате были реконструированы поверхности отклика и определены количественные зависимости между входными и выходными переменными. Пример функции поверхности отклика для модели определения ориентации здания по сторонам света и выполнения условий инсоляции приведена на рис. 8.

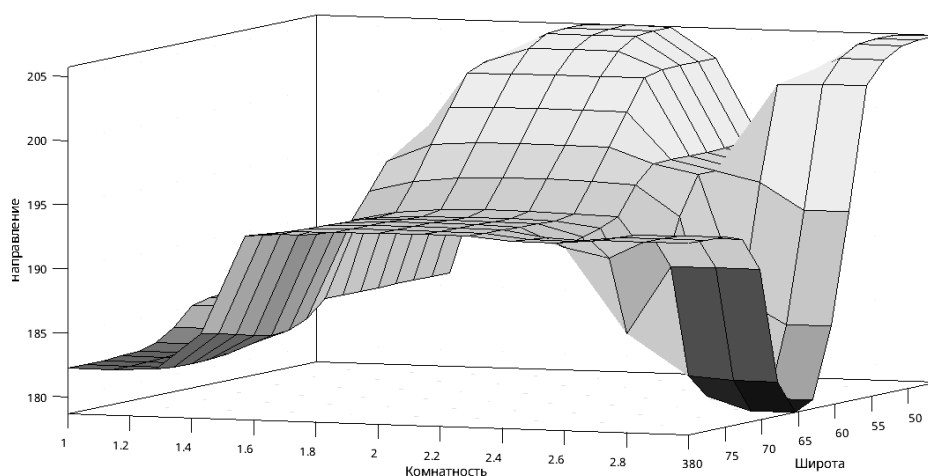


Рис. 8. Функция поверхности отклика переменных «количество комнат», шт., «географическая широта», град., «направление оси окна в секторах с азимутом», град.

В третьей главе диссертационного исследования представлены результаты экспериментальных исследований и приведено описание разработанного математического ПО. В результате проведённых исследований был создан прототип экспертной системы в виде программной платформы с эргономичным пользовательским интерфейсом.

Прототипы расчётных модулей экспертной системы (ЭС) были созданы в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений – программной платформы моделирования нечёткой логики системы Matlab (пакет Fuzzy Logic Toolbox). Для внедрения в практику разработанных экспертных систем был использован язык программирования Python, на котором был разработан графический пользовательский интерфейс.

Разработана архитектура экспертной системы, обобщённая структурная схема которой представлена на рис. 9. ЭС состоит из следующих функциональных элементов: база знаний, блок приобретения знаний, система логического вывода и пользовательский интерфейс. Система логического вывода обладает интерпретатором.

Посредством интерфейса пользователь получает доступ к знаниям и может интерпретировать полученные ответы экспертной системы в соответствии с содержимым базы знаний и правилами логического вывода.



Рис. 9. Обобщённая структурно-функциональная схема разработанной экспертной системы

Разработано логическое ядро экспертной системы, архитектура которого схематически приведена на рис. 11. Была разработана усовершенствованная платформа «ПрогрессСтройЭксперт» с пользовательским интерфейсом на языке Python, включая две многопрофильные экспертно-аналитические системы, объединяющие в себе группы экспертных модулей по назначению: «Посадка» (рис. 12) и «Оценка» (рис. 13).

На вход системы подаются чёткие значения входных переменных, на выходе – дефаззифицированные значения рассчитанных нечётких переменных в соответствии с функциональными блоками, представленными на рис. 11.

Данная программная реализация может запускаться в различных операционных системах (Windows OsX, Linux). Были использованы следующие библиотеки: PyLab для графического отображения результатов, Numpy для работы с массивами и матрицами, PySimpleGUI для создания графического пользовательского интерфейса, Skfuzz для нечёткой логики.

Итоговая структура и параметры разработанной ЭС по определению проектных характеристик многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству приведены в таблице 1.

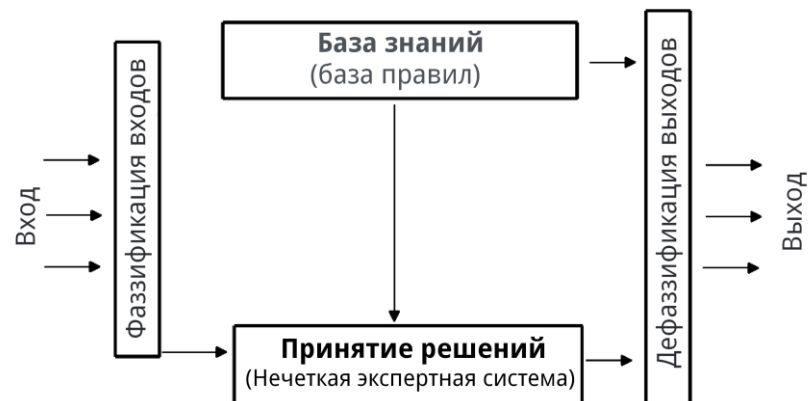


Рис. 10. Взаимосвязь основных функциональных блоков экспертной системы поддержки принятия решений

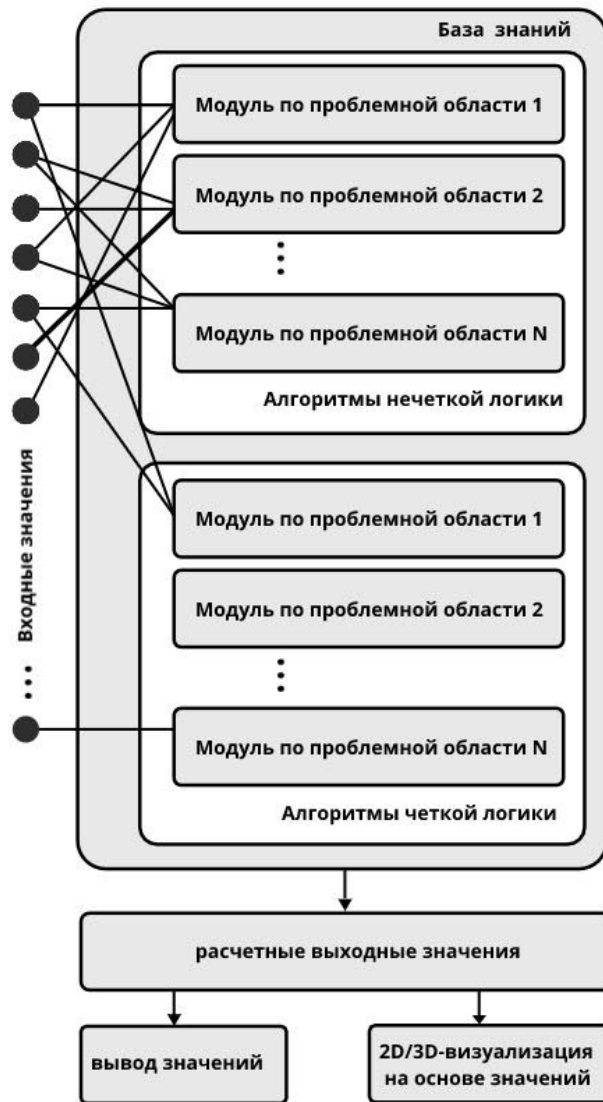


Рис. 11. Многомодульная архитектура базы знаний экспертной системы поддержки принятия решений

Рассмотрены различные аспекты взаимодействия между параметрами разработанного программного обеспечения. В прототипе ЭС используются не все возможные связи между входными параметрами и соответствующими им модулями. В общем случае одни и те же входные параметры могут соответствовать нескольким модулям логического вывода (часть входных переменных относится только к соответствующим модулям, а часть может применяться более чем в одном модуле).

В результате работы модулей логического вывода, на выход системы подаются выходные значения, доступные через графический пользовательский интерфейс.

Разработанная в результате диссертационного исследования информационная аналитическая система предназначена для решения комплексных проблем в области строительства, в том числе для управления рисками в проектах, обеспечения соответствия строительства нормам и правилам, а также для определения технического облика и проектных характеристик зданий на этапе подготовки к строительству. Описаны составные части разработанного программного обеспечения.

Таблица 1 – Характеристики систем поддержки принятия решений

Название подсистемы системы логического вывода			Кол-во правил	Кол-во входов	Кол-во функций	Алгоритм дефаззификации
ЭС трафик-анализа для подбора количества лифтов в жилой комплекс.			7	4	22	По элементу с наибольшей степенью принадлежности
ЭС оценки инвестиционной привлекательности жилых комплексов.			4	6	26	По элементу с наибольшей степенью принадлежности
ЭС под-	ЭС оцен-	Многоквартирные жилые до-	4	3	16	По элементу с наиболь-

держки принятия решений при по- садке объ- екта на земельный участок.	ки коли- чества этажей для по- садки объекта на зе- мельный участок	ма, смешанная жилая за- стройка для жилых районов				шей степенью принад- лежности
		Многоквартирные жилые до- ма, смешанная жилая за- стройка для кварталов	4	2	12	По элементу с наимень- шей степенью принад- лежности
		Блокированные жилые дома, для кварталов	3	2	9	Геометрическая середина множества
		Блокированные жилые дома, для жилых районов	3	2	9	По элементу с наимень- шей степенью принад- лежности
	ЭС определения ориентации оси окна		33	3	41	Среднее взвешенное зна- чение всех элементов (центр тяжести, Centroid)
ЭС оценки категории состояния зданий по внешним признакам и результатам предварительного обсле- дования			5	4	12	По элементу с наиболь- шей степенью принад- лежности
ЭС оценки индекса привлекательности строитель- ства			6	2	10	Среднее взвешенное зна- чение всех элементов (центр тяжести)
ЭС под- держки принятия инвести- ционных решений в строи- тельство на основе данных ДЗЗ	ЭС оценки индекса рентабельности ин- вестиций и инвестиционных рисков строительства объектов жилой застройки на основе региональных данных ДЗЗ		54	4	14	Среднее взвешенное зна- чение всех элементов (центр тяжести)
	ЭС оценки инвестиционных рисков строительства жилых зданий на основе информации о развитии действующей инфраструктуры, полученной на основе данных ДЗЗ		16	3	12	Среднее взвешенное зна- чение всех элементов (центр тяжести)
	ЭС оценки рентабельности инвестиций в строительство объектов жилой застрой- ки рядом с дорожно-транспортной ин- фраструктурой		9	2	9	Среднее взвешенное зна- чение всех элементов (центр тяжести)
	ЭС оценки инвестиционных рисков при строительстве объектов жилой застройки на основе данных по климатическим и геофизическим факторам		4	24	11	Среднее взвешенное зна- чение всех элементов (центр тяжести)
Всего:			152	61	203	

Экспертная система ПрогрессСтройЭксперт - ПОСАДКА

ЭС ВЫСОТНОСТЬ (на основании Постановления правительства Московской обл. от 26 июля 2022 г. N762/18)

плотность застройки жилыми домами, м2/га

коэффициент застройки жилыми домами, %

плотность населения, чел/га

рассчёт этажности жилого дома

блокированные жилые дома, для кварталов : 2 эт., коэфф.: 1.938

блокированные жилые дома, для жилых районов : 3 эт., коэфф.: 2.639

многоквартирные жилые дома, смешанная жилая застройка для жилых районов : 3 эт., коэфф.: 3.0

многоквартирные жилые дома, смешанная жилая застройка для кварталов : 1 эт., коэфф.: 1.378

Примечание: коэффициент предназначен для перерасчета высоты здания и высоты потолков.

ЭС ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ (на основании приложения А к ГОСТ Р 52941-200863)

этажность

общая грузоподъемность, кг

скорость, см/с

наибольшая поэтажная площадь квартир, м2

рассчёт количества лифтов

число лифтов : 3

ЭС НАПРАВЛЕНИЕ (с учётом гигиенических требований к инсоляции и СанПин 1.2.685-21)

Среднегодовая инсоляция, час/сут

Географическая широта, град

Количество комнат

рассчёт направления оси окна

направление оси окна : 86 град.

альтернативное направление : 298 град.

Примечание: 0(360) градусов - север, 180 градусов - юг, 270 градусов - запад, 90 градусов - восток.

Рис. 12. Интерфейс программы «Посадка»

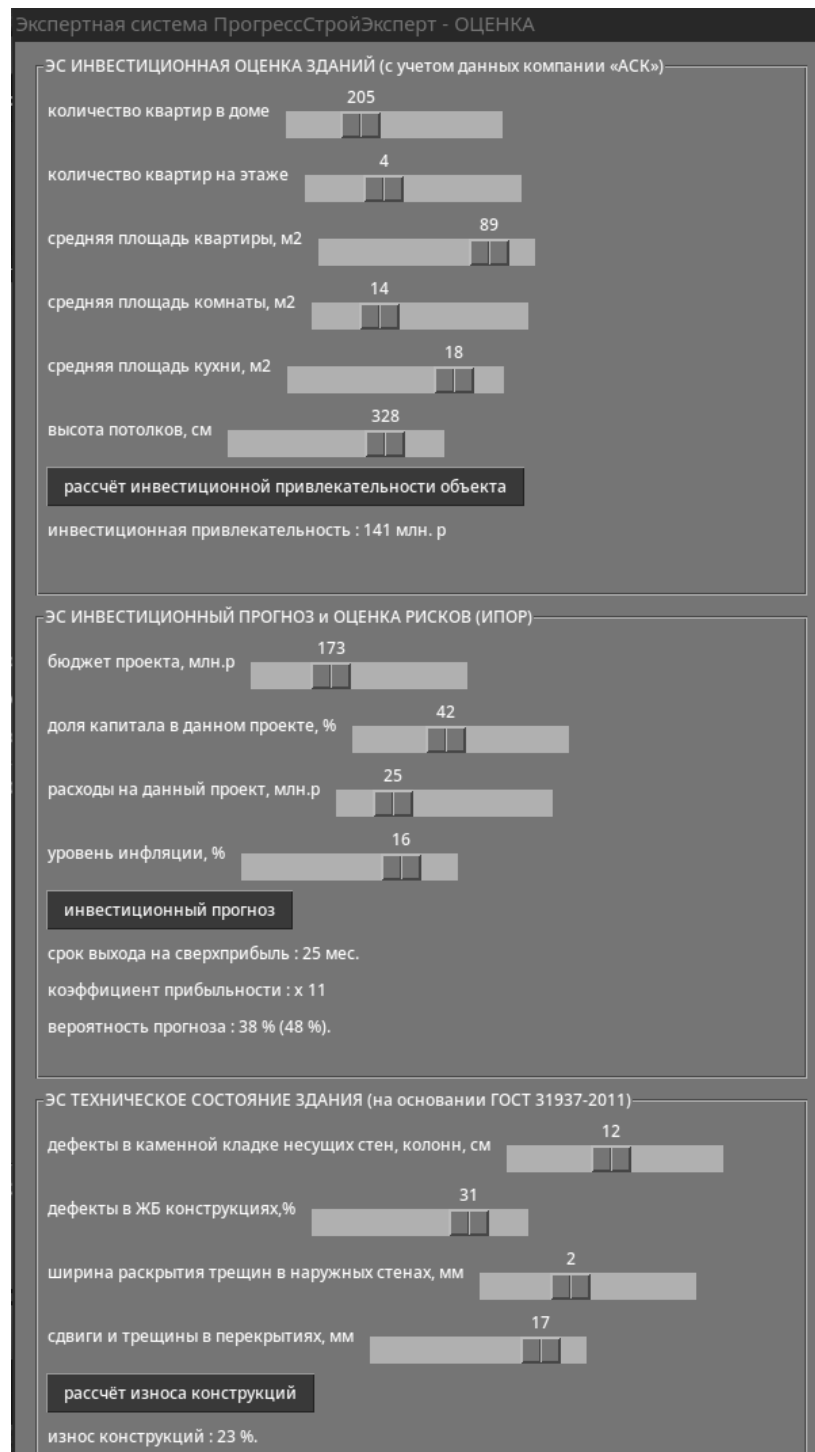


Рис. 13. Интерфейс программы «Оценка»

Описаны использованные методы программирования. При работе с целочисленными значениями (количество комнат, этажей, количества лифтов и пр.) полученные значения округлялись до целого числа. Методы дефаззификации выбирались для получения поверхностей отклика, описывающих соответствующие предметные области и задающих требуемый диапазон знаний выходных переменных и приведены в таблице.

Проведена оценка экономической эффективности применения разработанной методики по сравнению с имеющимися аналогами. Дана оценка перспектив развития разработанного математического программного обеспечения. Предполагается развитие разработанного прототипа экспертной системы для внедрения в практику путём расширения функционала, включая анализ данных о размерах строительной площадки, её расположении относительно других объектов, наличии коммуникаций, зданий и сооружений, которые уже находятся на площадке (эти данные могут быть получены из кадастровых карт, планов землепользования и отчётов об обследовании).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационное исследование направлено на развитие теории и практики совместного использования интеллектуальных систем и технологий ДЗЗ в строительной сфере. Проанализированы источники информации, выявлены проблемные области, определены переменные, подобраны функции принадлежности и разработана многомодульная экспертная система определения проектных характеристик многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству.

В результате проведенных исследований разработаны алгоритмы логического вывода с применением математического аппарата из теории нечётких множеств и создан прототип многопрофильной интеллектуальной экспертной системы для определения проектных характеристик многоквартирных жилых домов на стадии подготовки к строительству.

Исследование подтверждает значимость методологии автоматизированных экспертных оценок и обосновывает их потенциал для повышения экономической эффективности строительных процессов, поддержки принятия решений, обеспечения безопасности и высокого качества строительных сооружений.

Наряду с этим, в работе были получены следующие основные **выводы**:

1. проанализированы основные источники (публикации, ГОСТЫ, СанПиНы и пр.) для формирования базы знаний ЭС по определению проектных характеристик многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству;
2. установлено, что при наличии экспертных знаний применение нечёткого логического вывода для поддержки принятия решений является обоснованным и целесообразным;
3. решена задача параметрической оптимизации технического облика многоквартирных жилых домов, включающая идентификацию функций принадлежности лингвистических переменных и их области определения;
4. разработаны математические принципы определения инженерной концепции многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству, включающие определение проектных характеристик, архитектуру базы знаний и обобщённый алгоритм функционирования экспертной системы;
5. на основе экспертных знаний разработаны математические модели расчёта и установлены логические взаимосвязи между входными и выходными переменными;
6. реконструированы функции поверхности отклика и установлены количественные зависимости между переменными в каждом экспертном модуле базы знаний, определены зависимости проектных характеристик многоквартирных жилых домов с основными параметрами итоговой модели;
7. каждый модуль в разработанной экспертной системе имеет индивидуальный алгоритм дефазификации, что позволяет гибко подстраивать выходные значения для отражения специфики соответствующей проблемной области;
8. проведены тестовые испытания разработанных экспертных модулей информационной системы в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений;
9. разработка является вкладом в развитие технологии баз знаний и может быть развита в приложениях строительной тематики, требующих специализированных экспертных знаний для поддержки принятия инженерных решений в условиях неопределённости;
10. цель работы по созданию экспертно-аналитических методов и программной реализации экспертной системы с графическим пользовательским интерфейсом для определения проектных характеристик многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству, состоящей из системы логического вывода и набора взаимосвязанных нечётких экспертных баз знаний была достигнута.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Merkulov A.A., Razoumny Yu.N., Saltykova O.A., Stepanyan I.V. Statement of the Problem of Determining the Technical Appearance and Design Characteristics of Multi-Apartment Residential Buildings Based on the Systems Method // RUDN Journal of Engineering Research. V.25. №3. 2024. Pp.319-329.
2. Меркулов А.А. Экспертная система поддержки принятия решений в области строительства // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. Т.25. №4. 2024. С. 357367.
3. Меркулов А.А., Степанян И.В. Общие математические принципы определения инженерной концепции многоквартирных домов на основе экспертно-аналитических методов и систем поддержки принятия решений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т.26. №2. С.144-154.
4. Меркулов А.А., Салтыкова О.А., Разумный Ю.Н. Экономическая оценка применения экспертно-аналитических систем для проектирования многоквартирных жилых домов. Инженерный Вестник Дона. 2025. №11.

АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация посвящена развитию теории и практики применения метода экспертных систем для решения инженерных задач в строительной отрасли и представляет собой развитие методологии автоматизированных систем поддержки принятия инженерных решений, основанных на методах инженерии знаний и теории нечётких множеств. В результате проведённых исследований создан прототип экспертной системы в виде программной платформы с пользовательским интерфейсом. Приведены примеры интерфейсов и программного кода разработанной экспертной системы поддержки принятия решений в области строительства. Предложена реализация интеллектуальной системы поддержки принятия решений на базе алгоритма Мамдани. На основе методов инженерии знаний проанализированы источники информации в строительной области, включая массивы нормативной документации, рекомендации, классификационные таблицы и другие источники. В результате исследования разработаны экспертные методы, объединённые в единую информационно-аналитическую экспертную систему. Эта система создана в помощь застройщикам и проектировщикам на этапе подготовки к строительству. Внедрение предложенной методологии открывает новые перспективы применения экспертных систем для проектирования объектов жилищного фонда, а также инициирует дальнейшие исследования в области развития интеллектуальных информационных систем для определения технического облика и проектных характеристик многоквартирных жилых домов.

DISSERTATION ABSTRACT

This dissertation is devoted to the development of the theory and practice of applying expert systems to engineering problems in the construction industry. It represents the development of a methodology for automated engineering decision support systems based on knowledge engineering methods and fuzzy set theory. As a result of the research, a prototype expert system was created in the form of a software platform with a user interface. Examples of interfaces and program code for the developed expert decision support system in construction are provided. The implementation of an intelligent decision support system based on the Mamdani algorithm is proposed. Using knowledge engineering methods, information sources in the construction field were analyzed, including regulatory documentation, recommendations, classification tables, and other sources. The study resulted in the development of expert methods integrated into a unified information and analytical expert system. This system was created to assist developers and designers during the pre-construction phase. The implementation of the proposed methodology opens up new prospects for the use of expert systems for the design of housing objects and also initiates further research in the field of developing intelligent information systems for determining the technical appearance and design characteristics of multi-apartment residential buildings.