

На правах рукописи



Мамедов Тимур Габирович

**МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В
ПРОГНОЗНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА**

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы
программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель:	кандидат технических наук Массель Алексей Геннадьевич
Официальные оппоненты:	Юрин Александр Юрьевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория информационно-телекоммуникационных технологий исследования техногенной безопасности, ведущий научный сотрудник Полковская Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского», кафедра информатики и математического моделирования, заведующая кафедрой
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Красноярск

Защита диссертации состоится «27» октября 2026 года в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.118.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте ИСЭМ СО РАН: <https://isem.irk.ru/dissert2/case/DIS-2026-5/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355 на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.1.118.01.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.118.01,

доктор технических наук, доцент

Солодуша Светлана Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью совершенствования прогнозных исследований направлений развития топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности. Развитие ТЭК определяется совокупностью внешних и внутренних факторов, влияющих на условия функционирования энергетики, состав и значимость угроз, а также на обоснование стратегических решений. Это требует развития моделей и инструментальных средств, применяемых в исследованиях энергетической безопасности. Такие исследования развиваются как в зарубежных, так и в российских научных школах. В зарубежной литературе исследования энергетической безопасности преимущественно связаны с анализом уязвимости энергетической инфраструктуры, оценкой устойчивости энергетических систем к возмущающим воздействиям, надежности энергоснабжения потребителей, а также со сценарным анализом последствий реализации природных, техногенных, экономических и геополитических угроз. В России данные направления получили развитие в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН), Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), Институте энергетических исследований РАН (ИНЭИ РАН), Институте народнохозяйственного прогнозирования РАН (ИНП РАН), Центральном экономико-математическом институте РАН (ЦЭМИ РАН) и других организациях.

В ИСЭМ СО РАН в рамках исследований энергетической безопасности получило развитие направление, связанное с совместным использованием качественного и количественного анализа. В данном направлении применяются методы семантического моделирования для формализации экспертных знаний об угрозах, факторах и мероприятиях, а также методы математического моделирования для количественной оценки состояний ТЭК. Вместе с тем сохраняется проблема недостаточной формализации перехода от результатов семантического анализа к построению вычислительных сценариев и количественной оценке состояний ТЭК.

В связи с этим актуальной является разработка методов, моделей и инструментальных средств интеллектуальной поддержки принятия решений в

прогнозных исследованиях ТЭК, обеспечивающих интеграцию семантического, в том числе онтологического и когнитивного, моделирования с экономико-математической моделью ТЭК и вычислительным экспериментом.

Степень разработанности темы исследования. Исследования направлений развития топливно-энергетического комплекса, методов прогнозного анализа и обоснования стратегических решений в энергетике представлены в работах Л.А. Мелентьева, А.А. Макарова, А.С. Некрасова, Ю.Д. Кононова, Б.Г. Санеева и других авторов. В них заложены основы исследования развития ТЭК, анализа его балансовых, технологических и ресурсных ограничений, а также обоснования долгосрочных направлений развития энергетики.

Проблемы энергетической безопасности получили развитие в работах Ю.Н. Руденко, В.В. Бушуева, Н.И. Воропая, А.И. Татаркина, Л.Д. Криворучко, С.М. Сендерова, А.А. Куклина, Н.И. Пятковой, А.В. Еделева, М.Б. Чельцова и других исследователей. В этих работах раскрыты содержание понятия энергетической безопасности, классификации угроз, подходы к оценке надежности энергоснабжения потребителей, устойчивости энергетических систем и к обоснованию мер по снижению негативных последствий реализации угроз.

Методы семантического моделирования, применяемые для анализа сложных слабоструктурированных предметных областей, отражены в трудах Т.Р. Грубера, П.П. Грумпоса, Т.А. Гавриловой, В.В. Грибовой, З.К. Авдеевой, Ю.А. Загорулько, Г.Б. Загорулько, С.В. Смирновой, Л.Р. Черняховской, Э.А. Трахтенгерца, Л.В. Массель, А.Г. Масселя, Т.Н. Ворожцовой и других авторов. В этих исследованиях разработаны подходы к формализации знаний, построению онтологий, выявлению причинно-следственных связей и поддержке экспертного анализа.

Целью диссертационного исследования является разработка методов, моделей и программного комплекса для интеллектуальной поддержки принятия решений в прогнозных исследованиях ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ предметной области, существующих технологий и инструментальных средств проведения прогнозных исследований ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

2. Разработать методику интеграции семантического и математического моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

3. Модифицировать экономико-математическую модель ТЭК путем введения дополнительных уравнений, отражающих экономические, экологические и квазидинамические связи, что обеспечивает учет бюджетных, экологических и межпериодных ограничений при исследовании направлений развития ТЭК, и разработать формализованную модель вычислительного эксперимента, отличающуюся интеграцией математических и семантических моделей.

4. Разработать численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе метода Монте-Карло с использованием когнитивных весов.

5. Реализовать многоагентный программный комплекс ИНТЭК-SAW, поддерживающий предложенную методику, и модифицировать существующую технологию поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности на основе разработанного ПК.

Объект исследования – информационная технология прогнозных исследований ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

Предмет исследования – методы интеллектуальной поддержки принятия решений, включая методы интеграции математических и семантических моделей для прогнозных исследований топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности.

Научная новизна полученных результатов работы основана на модификации и развитии методов, моделей и программных средств прогнозных исследований топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности на основе формализованной интеграции семантического и математического моделирования:

1. Впервые для прогнозных исследований ТЭК разработана методика интеграции математических и интеллектуальных технологий, отличающаяся

совместным использованием онтологических, когнитивных и экономико-математических моделей и предусматривающая автоматизированный переход от качественного анализа к формированию вычислительных сценариев экономико-математической модели ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

2. Модифицирована экономико-математическая модель ТЭК путем введения дополнительных уравнений, отражающих экономические, экологические и квазидинамические связи, что обеспечивает учет бюджетных, экологических и межпериодных ограничений при исследовании направлений развития ТЭК. Разработана формализованная модель вычислительного эксперимента, отличающаяся совместным представлением математических и семантических моделей.

3. Разработан численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК, отличающийся учетом когнитивных весов при формировании множества сценарных параметров.

4. Модифицирована технология поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности, отличающаяся совместным использованием математических и семантических моделей, на основе применения разработанного многоагентного программного комплекса ИНТЭК-SAW.

Теоретическая значимость результатов заключается в разработке методического подхода к проведению исследований направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности, интегрирующего семантическое и математическое моделирование, отличающегося автоматизированным переходом от качественного анализа к количественному, а именно, от онтологических и когнитивных моделей к математическим моделям.

Практическая значимость диссертационной работы определяется расширением инструментальных возможностей прогнозных исследований ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности. Практическое применение результатов показано на вычислительных экспериментах по оценке последствий дефицита инвестиций в развитие газовой отрасли и влияния экологических ограничений на структуру топливно-энергетического баланса. Разработанный

программный комплекс ИНТЭК-SAW может использоваться при подготовке материалов для обоснования стратегических решений по развитию ТЭК и мероприятий по снижению негативных последствий реализации угроз энергетической безопасности.

Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается использованием результатов исследования в научно-исследовательской деятельности Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, передачей программного комплекса «ИНТЭК-SAW» в НИИ информационных технологий Ханты-Мансийского автономного округа (Югры), а также применением результатов в учебном процессе Иркутского национального исследовательского технического университета и Иркутского государственного университета.

Методами и средствами исследования являются методические основы построения информационных технологий и интеллектуальных информационных систем в исследованиях энергетики, методы ситуационного анализа, семантического (онтологического и когнитивного) моделирования, методы объектного подхода (анализ, проектирование, программирование).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика интеграции математических и интеллектуальных технологий, предусматривающая автоматизированный переход от качественного анализа к формированию вычислительных сценариев экономико-математической модели ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

2. Модифицированная экономико-математическая модель ТЭК, учитывающая экономические, экологические и квазидинамические связи, что обеспечивает учет бюджетных, экологических и межпериодных ограничений при исследовании направлений развития ТЭК. Разработанная формализованная модель вычислительного эксперимента, отличающаяся совместным представлением математических и семантических моделей.

3. Численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК, отличающийся использованием результатов обработки экспертных знаний, представленных в виде когнитивных весов причинно-следственных связей.

4. Модифицированная технология поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности, отличающаяся совместным использованием математических и семантических моделей, на основе применения разработанного многоагентного программного комплекса ИНТЭК-SAW.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) по следующим пунктам:

П.3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента (положения 3, 4, выносимые на защиту).

П.8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента (положения 1, 2, 4, выносимые на защиту).

П.9. Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий (технические науки) (положение 4, выносимое на защиту).

В диссертации представлены оригинальные результаты, соответствующие трем составляющим научной специальности 1.2.2:

1. **Математическое моделирование.** Модифицированная экономико-математическая модель территориально-отраслевого баланса ТЭК. Формализованная модель вычислительного эксперимента в прогнозных исследованиях топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности.

2. **Численные методы.** Разработан численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе когнитивных весов причинно-следственных связей.

3. **Комплексы программ.** Разработан и реализован многоагентный программный комплекс ИНТЭК-SAW, предназначенный для интеллектуальной поддержки принятия решений в прогнозных исследованиях ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации.

Обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием теории математического моделирования, системного анализа, линейного программирования, онтологического и когнитивного моделирования, а также согласованностью предложенных методов с задачами прогнозных исследований топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности. Достоверность результатов подтверждается корректностью постановок вычислительных экспериментов, использованием экономико-математической модели территориально-отраслевого баланса ТЭК, реализацией разработанных методических и алгоритмических решений в программном комплексе ИНТЭК-SAW, проведением серии расчетов по сценариям экологических, природных, техногенных и инвестиционных ограничений, а также содержательной непротиворечивостью полученных результатов известным закономерностям функционирования и развития ТЭК.

Апробация результатов работы. Результаты работы докладывались на Международных конференциях «International Conference of Young Scientists "Energy Systems Research"», г. Иркутск (Россия), 2021; «Science Present and Future: Research Landscape in the 21st century», г. Иркутск (Россия), 2022; «6th International Scientific Conference “Intelligent Information”», г. Стамбул (Турция), 2022; Международном конгрессе по интеллектуальным системам и информационным технологиям, Дивноморское (Россия), 2021 г.; научных семинарах «Critical Infrastructures in the Digital World», 2020–2026 гг.; XXV–XXIX Байкальских Всероссийских конференциях «Информационные и математические технологии в науке и управлении», г. Иркутск, 2020–2026 гг.; Международной конференции «Физико-техническая информатика – СРТ», г. Москва (Россия), 2022–2023 гг.

Результаты работы применены при выполнении:

– проектов, поддержанных грантами Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ): гранты РФФИ №20-07-00994 (2020–2022), №19-57-04003 (2019–2020), №18-07-00714 (2018–2020); грант Российского научного фонда (РНФ) №22-21-00841 (2021–2023).

– проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН: III.17.2.1 «Проблемы разработки, адаптации и применения интеллектуальных информационно-

телекоммуникационных технологий в интегрированных интеллектуальных энергетических системах», № госрегистрации АААА-А17-117030310444-2 (2017–2020);

– проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН: III.17.2 «Методология построения ИТ-инфраструктуры для разработки интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики», № госрегистрации АААА-А21-121012090007-7 (2021–2025).

По результатам представленной работы в 2022 году автору присуждена стипендия губернатора Иркутской области. Автор является лауреатом конкурса Иркутской области (2024 г.) в составе коллектива в номинации «За лучшие научные, научно-технические и инновационные разработки молодых ученых» за разработку «Цифровая платформа для поддержки устойчивости энергетических и экологических систем Иркутской области», в которую вошли результаты автора.

Публикации по теме диссертационной работы. По теме исследования опубликованы 18 работ, из них 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (К2), 3 статьи проиндексированы в Scopus и/или Web of Science, получено 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных.

Объем и структура работы. Диссертация объемом 216 страниц состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 108 наименований и трёх приложений. Работа включает 47 рисунков. Основной текст изложен на 186 страницах.

Личный вклад автора. При выполнении диссертационного исследования часть вопросов обсуждалась автором совместно с коллегами: постановка задачи исследования выполнена при поддержке научного руководителя к.т.н. А.Г. Масселя; методические вопросы применения семантического моделирования и фрактального подхода к структурированию знаний обсуждались с д.т.н. Л.В. Массель; вопросы применения экономико-математической модели ТЭЖ и проведения вычислительных экспериментов обсуждались с к.т.н. Н.И. Пятковой. В обсуждении результатов работы приняли участие к.т.н. А.Г. Массель, д.т.н. Л.В. Массель, к.т.н. Н.И. Пяткова, к.т.н. А.В. Еделев, д.т.н. С.М. Сендеров.

Автором лично выполнены следующие работы: разработана методика интеграции математического, онтологического и когнитивного моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности; выполнена модификация экономико-математической модели ТЭК за счет введения экономических, экологических и квазидинамических уравнений; разработана формализованная модель вычислительного эксперимента, обеспечивающая совместное представление математических и семантических моделей; разработан численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе метода Монте-Карло с использованием когнитивных весов; реализован многоагентный программный комплекс ИНТЭК-SAW; выполнены вычислительные эксперименты по оценке влияния экологических, природных, техногенных и инвестиционных ограничений на состояния ТЭК; проведены анализ и интерпретация полученных расчетных результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации, публикациях, структуре работы и личном вкладе автора.

В первой главе выполнен анализ текущего состояния прогнозных исследований топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности. Рассмотрены понятия энергетической безопасности, критических и чрезвычайных ситуаций в энергетике, основные виды угроз, а также общая схема исследований проблем энергетической безопасности, включающая формирование расчетных ситуаций, оценку состояний ТЭК и обоснование мероприятий по снижению последствий реализации угроз.

Проанализированы существующие подходы, технологии и инструментальные средства поддержки исследований энергетической безопасности, включая методы интеллектуальной поддержки анализа угроз,

онтологическое и когнитивное моделирование, зарубежные энергетические модели, российские модельно-информационные комплексы и разработки ИСЭМ СО РАН. Показано, что универсальные энергетические модели ориентированы преимущественно на исследование штатных сценариев долгосрочного развития, тогда как программные комплексы ИСЭМ СО РАН учитывают специфику задач энергетической безопасности, включая анализ критических и чрезвычайных условий.

Рассмотрено развитие инструментальных средств семантического моделирования в ИСЭМ СО РАН. Показано, что они обеспечивают формализацию знаний об объектах ТЭК, угрозах и мероприятиях, представление причинно-следственных связей и поддержку сценарного анализа. Вместе с тем переход от результатов семантического анализа к параметрам экономико-математической модели ТЭК и структуре вычислительного эксперимента остается недостаточно формализованным.

На основе выполненного анализа выявлены следующие ограничения существующих подходов и программных средств: отсутствие формализованного перехода от качественного анализа угроз и экспертных знаний к параметрам экономико-математической модели ТЭК; избыточность комбинаторного формирования расчетных вариантов; ограниченность базовой постановки модели в части учета инвестиционных, бюджетных, экологических и межпериодных условий; недостаточная поддержка пользовательского интерфейса при задании показателей и ограничений; ограниченность средств представления результатов расчета в терминах онтологических и когнитивных моделей. На этой основе сформулирована постановка диссертационного исследования.

Во второй главе разработаны методы и модели интеграции семантического и математического моделирования в прогнозных исследованиях ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности. Предложена формализованная модель вычислительного эксперимента на основе фрактального стратифицированного подхода к структурированию знаний.

Модель представляет вычислительный эксперимент как совокупность взаимосвязанных слоев информационного пространства, соответствующих методам семантического и математического моделирования, энергетической

инфраструктуре, угрозам и мероприятиям по обеспечению энергетической безопасности, моделируемым состояниям ТЭК и индикаторам энергетической безопасности. Отображения между слоями обеспечивают формализованный переход от качественного описания исследуемой ситуации к формированию сценарных условий, количественной оценке состояний ТЭК и последующей интерпретации результатов. В соответствии с этим подходом фрактальная стратифицированная модель вычислительного эксперимента в прогнозных исследованиях ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности задается через множество взаимосвязанных слоев информационного пространства:

$$Z = \{S, M, P, T, E, V, I\}, \quad (1)$$

где S – слой методов семантического моделирования, M – слой методов математического моделирования, P – слой энергетической инфраструктуры, T – слой угроз энергетической безопасности, E – слой мероприятий по обеспечению энергетической безопасности, V – слой моделируемых состояний ТЭК, I – слой индикаторов энергетической безопасности. Структурирование знаний выполнено на основе фрактального подхода, в рамках которого предметная область рассматривается как совокупность слоев и отображений между ними.

Типы отображений:

$F_M^P: P \rightarrow M$ – отображение из слоя энергетической инфраструктуры в слой математического моделирования;

$F_S^T: T \rightarrow S$ – отображение из слоя угроз в слой методов семантического моделирования;

$F_S^E: E \rightarrow S$ – отображение из слоя мероприятий в слой семантического моделирования;

$F_V^M: M \rightarrow V$ – отображение из слоя математического моделирования в слой моделируемых состояний ТЭК;

$F_V^S: S \rightarrow V$ – отображение из слоя семантического моделирования в слой моделируемых состояний ТЭК;

$F_I^V: V \rightarrow I$ – отображение из слоя моделируемых состояний ТЭК в слой индикаторов энергетической безопасности;

$F_S^I: I \rightarrow S$ – отображение из слоя индикаторов энергетической безопасности в слой методов семантического моделирования.

Математической основой вычислительного эксперимента является экономико-математическая модель территориально-отраслевого баланса ТЭК, представляющая собой задачу линейного программирования и описывающая добычу, переработку, преобразование, транспорт энергоресурсов и их потребление различными категориями потребителей. Модель имеет вид:

$$C^T X + \sum_{t \in T} r_t^T (R_t - Y_t) \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$AX - \sum_{t \in T} Y_t = 0, \quad (3)$$

$$0 \leq X \leq D, 0 \leq Y_t \leq R_t, t \in T, \quad (4)$$

где X – вектор интенсивностей использования технологических способов функционирования энергетических объектов; A – матрица технологических коэффициентов производства, переработки, преобразования и транспорта энергоресурсов; Y_t – вектор объемов потребления топлива и энергии потребителями категории t ; D – вектор технически допустимых интенсивностей использования технологических способов; R_t – вектор заданного спроса; C – вектор удельных приведенных затрат; r_t – вектор удельных ущербов от дефицита энергоресурсов.

В диссертационной работе модель модифицирована путем введения дополнительных уравнений и ограничений, отражающих экономические, экологические и квазидинамические связи. Данная модификация направлена на учет инвестиционных, бюджетных, экологических и межпериодных условий, влияющих на допустимую область расчетной модели и реализуемость вариантов развития ТЭК:

$$\sum_{i \in J_I} k_i x_i \leq I, \quad (5)$$

где J_I – множество технологических способов, требующих инвестиционного обеспечения; k_i – удельные капитальные вложения; x_i – интенсивность использования технологического способа; I – допустимый объем инвестиционных ресурсов.

Экологические ограничения на суммарные выбросы загрязняющих веществ:

$$E_r^{(p)} \leq L_r^{(p)}. \quad (6)$$

Расчет суммарных выбросов загрязняющего вещества выполняется по формуле:

$$E_r^{(p)} = \sum_{i \in F_r} a_i^{(p)} F_i, \quad (7)$$

где $E_r^{(p)}$ – суммарные выбросы загрязняющего вещества p в регионе r ; F_i – объем использования топлива вида i ; $a_i^{(p)}$ – коэффициент выбросов; $L_r^{(p)}$ – допустимый уровень выбросов.

Квазидинамические ограничения используются для учета межпериодных последствий сценарных решений. В отличие от динамической модели, связь между расчетными периодами задается процедурой переноса последствий сценарного расчета периода t на параметры оптимизационной задачи периода $t + 1$:

$$P_j^{(t+1,s)} = \Phi_j(P_j^{(t+1,0)}, \Delta_j^{(t)}), \quad (8)$$

где $P_j^{(t+1,s)}$ – корректируемый параметр сценарной модели следующего периода; $P_j^{(t+1,0)}$ – соответствующий параметр базовой модели; $\Delta_j^{(t)}$ – межпериодное отклонение; Φ_j – функция межпериодного переноса.

Модифицированная экономико-математическая модель обеспечивает количественную оценку состояний ТЭК с учетом экономических, экологических и межпериодных условий, однако не задает механизм перехода от экспертного описания угроз, факторов и мероприятий к изменению параметров расчетной модели. Для формализации этого перехода разработана методика интеграции математического, онтологического и когнитивного моделирования, связывающая онтологическое представление структуры модели ТЭК и когнитивные карты исследуемых ситуаций с параметрами экономико-математической модели и вычислительными сценариями.

Методика включает следующие этапы:

1. Формирование реляционной базы данных для совместного представления экономико-математической модели, вычислительных сценариев, онтологий и когнитивных карт.

2. Автоматизированное построение онтологического представления фрагмента экономико-математической модели ТЭК.

3. Формирование когнитивной карты, связывающей угрозы и мероприятия с элементами расчетной модели.

4. Формирование и реализация вычислительного сценария исследования.

На первом этапе формируется реляционная база данных, связывающая элементы экономико-математической модели с онтологическими концептами и вычислительными сценариями. На втором этапе автоматически строится онтология фрагмента модели, отражающая топливно-энергетические ресурсы, технологические процессы и взаимосвязи между элементами ТЭК. На третьем этапе на основе онтологии формируется когнитивная карта, отражающая причинно-следственные отношения между изменениями значений факторов, влияющих на развитие ТЭК, и изменениями значений показателей, характеризующих состояние ТЭК. На четвертом этапе формируется вычислительный сценарий, включающий базовый и сценарные варианты модели, выполняются оптимизационные расчеты и интерпретация полученных результатов с использованием семантических моделей.

Для перехода от экспертных оценок причинно-следственных связей к численным параметрам экономико-математической модели разработан метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе когнитивных весов. Метод предназначен для учета неопределенности экспертных оценок сценарных воздействий и обеспечивает формирование множества количественных реализаций параметров расчетной модели. В отличие от классического применения метода Монте-Карло, параметры вероятностного распределения формируются с учетом агрегированных когнитивных воздействий и степени уверенности экспертов.

Вычислительная процедура включает задание базовой экономико-математической модели, построение взвешенной когнитивной карты, сопоставление ее концептов с параметрами модели и генерирование случайных корректировок. Для каждой реализации решается оптимизационная задача. По совокупности решений определяются диапазоны изменения исследуемых

показателей и статистические характеристики результатов. Блок-схема метода приведена на Рисунке 1.

Рассмотрены проектные решения программного комплекса ИНТЭК-SAW, обеспечивающего формирование вычислительных сценариев, корректировку параметров экономико-математической модели, выполнение оптимизационных расчетов и представление результатов в расчетной и семантической формах.

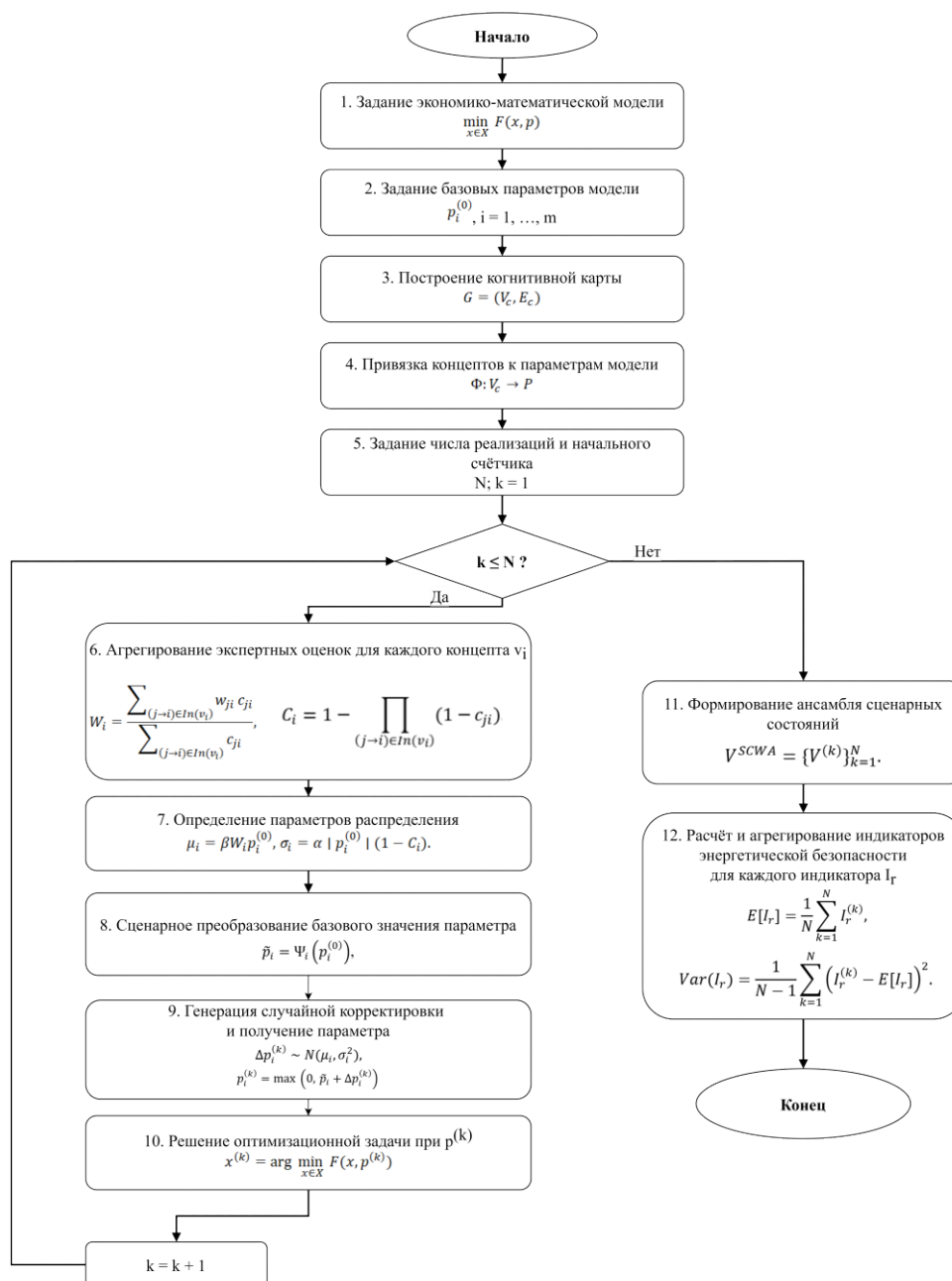


Рисунок 1 – Блок-схема численного метода стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе когнитивных весов

В третьей главе представлена реализация многоагентного программного комплекса ИНТЭК-SAW, предназначенного для интеллектуальной поддержки принятия решений в прогнозных исследованиях направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности. Архитектура программного комплекса представлена на Рисунке 2.

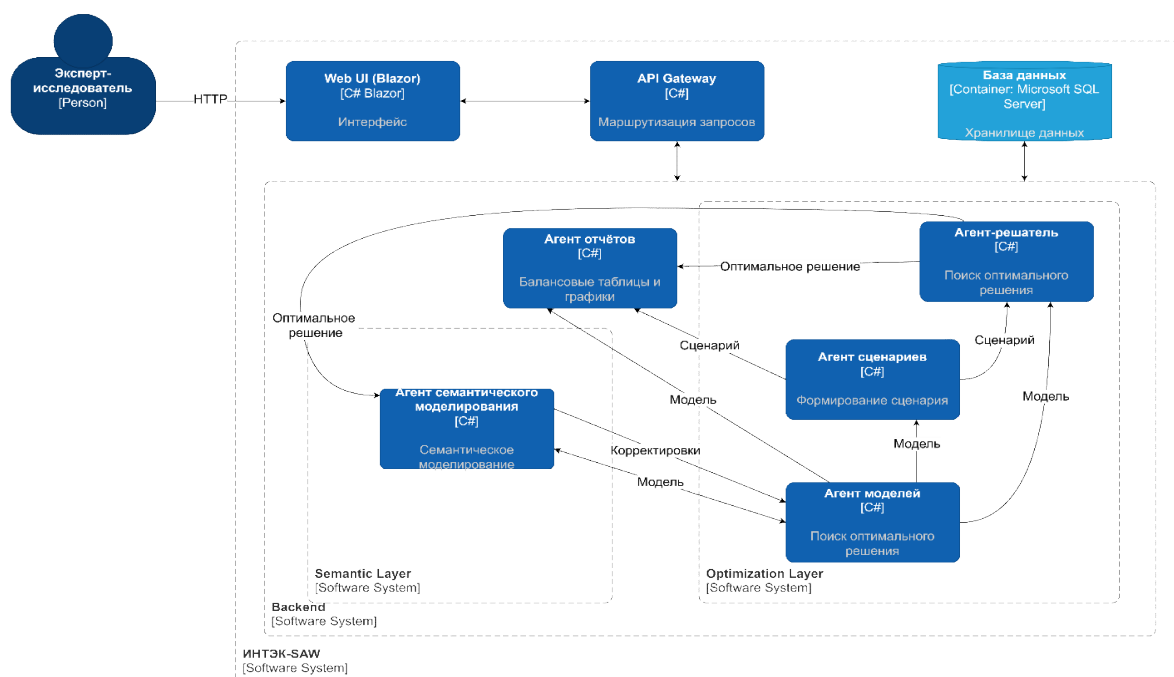


Рисунок 2 – Архитектура программного комплекса ИНТЭК-SAW

Архитектура программного комплекса построена на основе многоагентного подхода и включает агент семантического моделирования, обеспечивающий формирование онтологических и когнитивных моделей; агент сценариев, формирующий вычислительные сценарии на основе угроз, мероприятий и корректировок параметров модели; агент моделей, обеспечивающий формирование и модификацию вариантов экономико-математической модели ТЭК; агент-решатель, выполняющий оптимизационные расчеты; агент формирования отчетов, предназначенный для представления и интерпретации результатов вычислительного эксперимента. Взаимодействие агентов обеспечивает совместное использование семантических моделей, экономико-

математической модели ТЭК и вычислительных сценариев в едином цикле исследования.

Модифицирована технология поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности, отличающаяся совместным использованием математических и семантических моделей, на основе применения разработанного многоагентного программного комплекса ИНТЭК-SAW. Этапы технологии приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Этапы технологии исследования направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности, интегрирующей семантическое и математическое моделирование

№	Этапы технологии	Инструментальные средства	Результаты этапа
1	Построение экономико-математической модели	Агент моделей	Базовый вариант модели ТЭК
2	Построение онтологии	Агент семантического моделирования	Онтологическая модель состояния ТЭК
3	Формирование когнитивной карты	Агент семантического моделирования	Когнитивная карта исследования
4	Формирование вычислительного сценария	Агент сценариев; Агент моделей; Агент семантического моделирования	Вычислительный сценарий; Когнитивные карты развития ТЭК в условиях возмущений и управлений
5	Поиск оптимального решения	Агент-решатель	Оптимальные значения переменных вариантов моделей сценария
6	Интерпретация результатов	Агент формирования отчётов; агент семантического моделирования	Балансовые таблицы; когнитивные карты и онтологии с числовыми значениями

Работоспособность разработанных методов, моделей и программных средств подтверждена серией вычислительных экспериментов. В первом эксперименте

исследовано влияние ужесточения экологических ограничений по выбросам CO_2 на параметры топливно-энергетического баланса Сибирского федерального округа. Во втором эксперименте рассмотрена природная угроза маловодья на Ангара-Енисейском каскаде ГЭС, влияющая на выработку гидроэлектростанций и структуру генерации в Сибирском федеральном округе. В третьем эксперименте исследована техногенная угроза, связанная с повреждением Уральского газотранспортного коридора и ограничением подачи природного газа из Западной Сибири через Урал в европейскую часть России. В четвертом эксперименте выполнена оценка отложенных последствий дефицита инвестиций в развитие газовой отрасли на период 2025–2030 гг. с использованием квазидинамических уравнений, обеспечивающих учет влияния сценарных изменений одного расчетного периода на условия последующего периода.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы. В приложениях представлены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, основные виды угроз энергетической безопасности, а также акты о внедрении результатов диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате выполнения диссертационной работы достигнута поставленная цель: разработаны методы, модели и программный комплекс для интеллектуальной поддержки принятия решений в прогнозных исследованиях ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

Автором получены следующие основные результаты:

1. Выполнен анализ предметной области, существующих технологий и инструментальных средств проведения прогнозных исследований ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

2. Впервые для прогнозных исследований ТЭК разработана методика интеграции математических и интеллектуальных технологий, отличающаяся совместным использованием онтологических, когнитивных и экономико-математических моделей и предусматривающая автоматизированный переход от качественного анализа к формированию вычислительных сценариев экономико-математической модели ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

3. Модифицирована экономико-математическая модель ТЭК путем введения дополнительных уравнений, отражающих экономические, экологические и квазидинамические связи, что обеспечивает учет бюджетных, экологических и межпериодных ограничений при исследовании направлений развития ТЭК, и разработана формализованная модель вычислительного эксперимента, отличающаяся совместным представлением математических и семантических моделей.

4. Разработан численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК, отличающийся учетом когнитивных весов при формировании множества сценарных параметров.

5. Реализован многоагентный программный комплекс ИНТЭК-SAW, поддерживающий предложенную методику, и модифицирована технология поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности на основе разработанного ПК.

Результаты диссертационной работы переданы для использования в научно-исследовательской деятельности Института энергетики Национальной академии наук Беларуси; программный комплекс «ИНТЭК-SAW» передан в НИИ информационных технологий Ханты-Мансийского автономного округа (Югры), а также результаты работы применяются в учебном процессе Иркутского национального исследовательского технического университета и Иркутского государственного университета.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по научной специальности 1.2.2:

1. **Мамедов, Т. Г.** Интеграция математического и когнитивного моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции энергетической безопасности / А. Г. Массель, **Т. Г. Мамедов** // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2025. – № 3(39). – С. 61–71.

2. **Мамедов, Т. Г.** Особенности исследования влияния угроз энергетической безопасности на надежность энергоснабжения потребителей в

современных условиях / Н. И. Пяткова, **Т. Г. Мамедов** // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2025. – № 4(40). – С. 128–137.

3. **Мамедов, Т. Г.** Оценка устойчивости энергетических систем с применением методов машинного обучения / Л. В. Массель, А. Г. Массель, **Т. Г. Мамедов**, Д. А. Гаськова, А. Р. Цыбиков, Н. И. Щукин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 248–261.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по другим специальностям:

1. **Мамедов, Т. Г.** Программный компонент интеграции когнитивного и математического моделирования в экосистеме знаний в энергетике / А. Г. Массель, **Т. Г. Мамедов** // Системы высокой доступности. – 2026. – Т. 22, № 1. – С. 35–40.

Публикации в научных изданиях, индексируемых Scopus и/или Web of Science:

1. **Mamedov T.** Integration of Intelligent and Mathematical Technologies for Decision Support in Research and Ensuring Energy Resilience / L. Massel, A. Massel, **T. Mamedov** // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’22) / eds. S. Kovalev, A. Sukhanov, I. Akperov, S. Ozdemir. – Cham : Springer, 2023. – Vol. 566. – P. 60–72. – (Lecture Notes in Networks and Systems).

2. **Mamedov, T. G.** Multi-Agent Software Complex for Researching the Direction of Development of the Fuel and Energy Complex Taking into Account Energy Security “INTEC-A” / **T. G. Mamedov**, A. G. Massel // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 289. – Article 03004.

3. **Mamedov T.** Integration of Mathematical and Cognitive Modelling in the Software Package “INTEC-A” / L. Massel, A. Massel, **T. Mamedov** // Engineering Proceedings. – 2023. – Vol. 33, No. 1. – Article 26.

Публикации в других изданиях:

1. **Мамедов Т. Г.** Сервисы для обработки данных и знаний в экосистеме знаний в энергетике / Л. В. Массель, А. Г. Массель, В. Р. Кузьмин, **Т. Г. Мамедов**, Д. А. Гаськова // Двадцать вторая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием, КИИ-2025, Санкт-Петербург, 6–10

октября 2025 г. : труды конференции : в 3 т. – Санкт-Петербург : Изд-во СПб ФИЦ РАН, 2025. – Т. 3. – С. 217–227.

2. **Мамедов, Т. Г.** Программный комплекс и цифровая модель ТЭК как основа цифрового двойника на основе интеллектуальных технологий / А. Г. Массель, **Т. Г. Мамедов** // Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2021» («ИС & ИТ-2021», «IS&IT'21»). – 2021. – С. 254–260.

3. **Мамедов, Т. Г.** Технология вычислительного эксперимента в исследованиях работы энергетических отраслей при реализации угроз энергетической безопасности / А. Г. Массель, **Т. Г. Мамедов**, Н. И. Пяткова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2021. – № 3(23). – С. 62–73.

4. **Мамедов, Т. Г.** Адаптация методики реинжиниринга унаследованных программных систем / А. Г. Массель, **Т. Г. Мамедов** // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2021. – № 4(24). – С. 88–99.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных:

1. **Мамедов, Т. Г.** Программный комплекс «ИНТЭК-SAW» / Л. В. Массель, А. Г. Массель, **Т. Г. Мамедов** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025690744. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2025690480; заявл. 11.11.2025; зарегистр. 11.11.2025. Бюл. № 11.

2. **Мамедов Т. Г.** База данных программного комплекса для исследований направлений развития ТЭК (ИНТЭК-SAW) / Л. В. Массель, А. Г. Массель, **Т. Г. Мамедов** // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025625362. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2025625063; заявл. 11.11.2025; зарегистр. 21.11.2025. Бюл. № 12.

3. **Мамедов Т. Г.** Веб версия ПК «ИНТЭК-А» / Л. В. Массель, А. Г. Массель, **Т. Г. Мамедов** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686175. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2024685831; заявл. 06.11.2024; зарегистр. 06.11.2024. Бюл. № 11.

4. **Мамедов Т. Г.** Программный комплекс «ИНТЭК-А» / Л. В. Массель, А. Г. Массель, **Т. Г. Мамедов** // Свидетельство о государственной регистрации

программы для ЭВМ № 2022682594. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2022681771; заявл. 16.11.2022; зарегистр. 24.11.2022. Бюл. № 12.

5. **Мамедов Т. Г.** Менеджер управления сценариями (SDECIM) / Л. В. Массель, А. Г. Массель, **Т. Г. Мамедов** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667849. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2020663456; заявл. 04.11.2020; зарегистр. 29.12.2020. Бюл. № 1.

6. **Мамедов Т. Г.** Менеджер управления словарями (VIM) / Л. В. Массель, А. Г. Массель, **Т. Г. Мамедов** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667041. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2020663388; заявл. 03.11.2020; зарегистр. 21.12.2020. Бюл. № 1.

7. **Мамедов Т. Г.** Менеджер управления моделями (MIM) / Л. В. Массель, А. Г. Массель, **Т. Г. Мамедов** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666559. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2020663405; заявл. 04.11.2020; зарегистр. 11.12.2020. Бюл. № 12.

Подписано в печать 23.07.26 г.

Отпечатано в типографии ООО «ЛОГОМИР»
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, оф 116
Заказ № 1999. Тираж 100 шт.