Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

На правах рукописи



Кисленко Николай Анатольевич

Методология и интеллектуально-вычислительные инструменты принятия решений по эффективному развитию единой системы газоснабжения

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», обществе с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт экономики и организации управления в газовой промышленности».

Научный руководитель (консультант) академик РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ Мешалкин Валерий Павлович, директор Международного института Логистики ресурсосбережения и технологической инноватики (НОЦ) РХТУ им. Д.И. Менделеева, профессор кафедры логистики и экономической информатики ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, Темкин Игорь Олегович	ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», заведующий кафедрой Автоматизированных систем управления
доктор технических наук, профессор, Щербаков Максим Владимирович	ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», заведующий кафедрой Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования
доктор технических наук, профессор, Веревкин Александр Павлович	ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», профессор кафедры Автоматизация, телекоммуникация и метрология

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Защита состоится 22 декабря 2026 г. В 11:00 на заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.10 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева». (125047, г. Москва, Миусская пл., 9, ауд. 443, конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета РХТУ.2.6.10, к.т.н., доцент — В.А. Василенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время при реализации проектов технологического лидерства в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК) Российской Федерации возникают новые научно-исследовательские и организационно-технические проблемы, обусловленные усилением конкуренции между добывающими природный газ (ПГ) регионами мира, интенсивным развитием возобновляемых источников энергии (ВИЭ), масштабным переходом на использование электромобилей. Наблюдается ухудшение структуры топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и запасов углеводородного сырья (УВС) из-за увеличения себестоимости освоения новых залежей ПГ, что снижает рентабельность предприятий ТЭК, взаимосвязанных в единую цепь поставок (ЦП) от добычи и переработки ПГ до его транспортировки и реализации. В связи с этими крупными организационно-экономическими и научно-технологическими проблемами на первый план выходит необходимость разработки новых научно обоснованных технических, технологических и системно-аналитических решений по минимизации затрат на весь цикл функционирования единой системы газоснабжения (ЕСГ), входящей в структуру ТЭК, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономики Российской Федерации. Прежде всего это связано с требованием полной синхронизации ввода мощностей по добыче, транспорту и переработке ПГ при строительстве новых магистральных газотранспортных систем (МГТС), модернизации и капитальном ремонте действующей ЕСГ. **Единая система газоснабжения** России – это уникальная комплексная масштабная производственная организационно-экономическая система, состоящая из совокупности взаимосвязанных в цепь поставок (ЦП) подсистем добычи и транспортировки ПГ, подсистем переработки, хранения и распределения ПГ.

Для разработки и реализации проектов энергоресурсоэффективного развития ЕСГ в условиях обеспечения технологического лидерства и реализации технологического суверенитета РФ необходимо решать следующие актуальные важнейшие научно-исследовательские технологические задачи: совершенствование методологии оценки энергоресурсоэффективности проектов развития ЕСГ с длительной инвестиционной фазой с учетом действующих объектов ЕСГ; разработка адаптивных методов рационального выбора инвестиционных проектов эффективного развития ЕСГ с различными параметрами рисков при портфельной оптимизации ЕСГ в условиях

неопределенности.

Сложность решения указанных научно-исследовательских задач требует широкого применения методологии системного анализа для разработки качественно новых научно-технологических и организационно-управленческих системно-аналитических решений по эффективному развитию ЕСГ и ТЭК в целом с использованием современных методов искусственного интеллекта (ИИ) и различных интеллектуально-вычислительных инструментов промышленной революции «Индустрия 4.0» в условиях цифровой экономики и экономики замкнутого цикла.

ЕСГ – это важнейший объект научных исследований при реализации следующих проектов технологического лидерства России: «Новые атомные и энергетические технологии», «Новые материалы и химия», «Средства производства и автоматизации», «Экономика данных и цифровая трансформация государства», а также национальных проектов «Экология» и «Цифровая экономика».

На основании вышеизложенного поставленная и решенная в настоящей научно-квалификационной работе новая крупная научная проблема **разработки методологии и интеллектуально-вычислительных инструментов принятия системно-аналитических решений по эффективному развитию ЕСГ** имеет актуальное научное и стратегически важное экономическое значение для обеспечения технологического лидерства и реализации технологического суверенитета РФ.

Актуальность и важность научных исследований диссертации подтверждается тем, что основные разделы научно-квалификационной работы соответствуют следующим важнейшим нормативно-правовым документам научно-технологического развития РФ: Указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития РФ»; Указ Президента РФ от 18.06.2024 № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий»; Указ Президента РФ от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития РФ на период до 2030 года»; Указ Президента РФ от 10.10.2019 № 490 (ред. от 15.02.2024) «О развитии искусственного интеллекта в РФ» (вместе с «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года»).

Степень разработанности научной проблемы. Методы системного анализа широко используются в научных исследованиях по теории углеводородных гидравлических цепей (ГЦ) и сложных энергетических систем, к которым относится ЕСГ.

Следует отметить основополагающие работы научных сотрудников Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН и Института энергетических исследований РАН, а также научные работы по инжинирингу сложных ГЦ и трубопроводных систем, чл.-корр. РАН А.П. Меренкова, профессоров В.Я. Хасилева и М.Г. Сухарева; научно-исследовательские разработки научной школы академика РАН В.П. Мешалкина по интеллектуально-вычислительным методам и инструментам автоматизированного инжиниринга, планирования строительства, обеспечения надежности и иерархического управления эксплуатацией энергоресурсосберегающих экологически безопасных систем газоснабжения регионов.

В начале 2000-х годов активно развивались научно-исследовательские работы (НИР) по методам системного анализа и оптимизации объектов ТЭК, включая газовую промышленность, выполненных профессорами, д-рами техн. наук А.С. Казаком, Н.Н. Новицким и В.А. Сотниковым.

Особый интерес представляют научно-исследовательские разработки по обеспечению экологической безопасности предприятий ТЭК и управлению охраной окружающей среды чл.-корр. РАН, д-ра техн. наук О.Е. Аксютина и профессора, д-ра хим. наук А.Г. Ишкова, по методам управления безопасностью и надежностью промышленных производств профессоров, д-ров техн. наук А.Ф. Егорова и Т.В. Савицкой, по системному анализу и управлению промышленными производствами профессоров, д-ров техн. наук В.И. Бобкова, А.А. Большакова, А.П. Веревкина и Т.Б. Чистяковой.

Важное экономическое и природоохранное значение имеют научные работы академика РАН В.П. Мешалкина, профессоров О.Б. Бутусова, Е.Р. Мошева и В.М. Панарина, канд. техн. наук Р.Р. Кантюкова и канд. техн. наук Р.А. Кантюкова по численному анализу нестационарных газовых течений в сложных ГТС, по компьютерному мониторингу и оценке воздействия химических загрязнений объектов ГТС на окружающую среду (ОС), по оптимальному планированию технического обслуживания и ремонтов ГТС с использованием интеллектуально-эвристических методов.

Необходимо отметить научные работы по применению теории ИИ, ИНС и природовдохновленных алгоритмов для анализа и оптимизации ХТП и ХЭТС академика РАН В.П. Ананикова, академика РАН Н.С. Зефирова, академика РАН В.П. Мешалкина,

академика РАН И.А. Шеремета, чл.-корр. РАН Е.И. Карпенко, чл.-корр. РАН М.В. Фёдорова, профессоров, д-ров техн. наук А.А. Большакова, В.В. Борисова, М.И. Дли, Т.Б. Чистяковой, д-ра хим. наук А.А. Павлова, иностранных ученых D. Rudd, I. Grouman, A. Westerberg, J. Veladi, G.B. Nagar, J.R. Banga, G. Stephanopoulos, M.O. Coppens, X. Jang.

В настоящее время необходима разработка методологии и интеллектуально-вычислительных инструментов принятия системно-аналитических решений по эффективному развитию ЕСГ, **научно обоснованному прогнозированию синхронного наращивания мощностей по добыче и транспортировке ПГ, потреблению и переработке ПГ, а также разработка методов автоматизированного прогнозирования газопотребления и инжиниринга сложных энергоресурсоэффективных МГТС с применением теории графов и искусственных нейронных сетей (ИНС)**.

Цель научного исследования: разработка методологии и интеллектуально-вычислительных инструментов принятия системно-аналитических решений по эффективному развитию ЕСГ, как части ТЭК Российской Федерации, с учетом использования различных видов ТЭР и ВИЭ, ввода в эксплуатацию новых месторождений ПГ как в регионах России, так и в зарубежных странах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные **взаимосвязанные научно-технические задачи**.

1. **Провести** аналитический **обзор** основных современных научных исследований по методам системного анализа и планирования эффективного развития ТЭК и ЕСГ РФ.

2. **Разработать** метод системно-аналитической оценки потенциала эффективного потребления природного газа.

3. **Разработать** вероятностно-статистический метод прогнозирования спроса на ПГ для различных категорий потребителей.

4. **Разработать** метод долгосрочного прогнозирования энергопотребления для различных регионов мира и субъектов Российской Федерации.

5. **Разработать** имитационный агентно-ориентированный метод анализа баланса спроса и предложения на ПГ.

6. **Научно обосновать** специфику применения ИНС для прогнозирования потребления ПГ в ЕСГ. **Предложить методологию разработки** различного вида ИНС-

моделей долгосрочного прогнозирования потребления ПГ. **Выполнить системный** анализ эффективности использования различных видов ИНС-моделей для прогнозирования газопотребления.

7. **Разработать** математическую постановку и метод решения задачи оптимизации комплексной ГТС **с использованием** обучаемой ИНС-модели.

8. **Разработать** номограммно-аналитический метод выбора экономически эффективных поставок различных видов газосодержащих ТЭР по новым маршрутам.

9. **Разработать** комбинированный метод компьютеризированного анализа функционирования перерабатывающих производств ПГ и газового конденсата.

10. **Предложить** методы принятия решений по оценке экономической эффективности и выбору рациональных инвестиционных проектов.

11. **Предложить** метод автоматического составления материально-энергетических балансов производств газовой отрасли как сложных ХЭТС.

12. **Разработать** архитектуру и режимы функционирования комплекса пакетов программ принятия системно-аналитических решений по эффективному развитию ЕСГ в целом и мониторингу функционирования основных объектов ЕСГ.

13. **Разработать** метод оптимального размещения станций контроля теплотворной способности транспортируемого ПГ в структуре ГТС.

14. **Практически применить** основные результаты выполненных НИР в различных производственно-технических и организационно-управленческих ведомственных и отраслевых разработках.

Объект исследования: ЕСГ как сложная производственная организационно-экономическая система, представляющая собой цепь поставок, состоящую из совокупности взаимосвязанных предприятий – производителей, поставщиков и потребителей ПГ, федеральных и региональных регуляторов.

Предмет исследования: методология принятия научно обоснованных системно-аналитических решений по прогнозированию эффективного развития ЕСГ; по инжинирингу различных объектов энергоресурсоэффективных МГТС; по научно обоснованному выбору рациональных инвестиционных проектов эффективного развития ЕСГ; специальные интеллектуально-вычислительные инструменты и комплексы пакетов прикладных программ принятия решений по энергоресурсоэффективному развитию основных подсистем ГТС и ЕСГ.

Методы исследования: методы системного анализа; методы теории графов; методы теории ИИ; методы НС-анализа и прогнозирования; методы математического моделирования и нелинейного программирования; методы обработки больших массивов данных; методы математической статистики и регрессионного анализа; методы теории ГЦ; методы кибернетики химико-технологических процессов (ХТП); методы теории анализа и синтеза сложных химико-технологических систем (ХТС); методы теории оптимального управления; методология создания проблемно-ориентированных комплексов пакетов программ и информационных систем поддержки принятия решений (СППР).

Научная новизна диссертационной работы

1. **Разработан** метод системно-аналитической оценки потенциала эффективного потребления природного газа в ЕСГ, **отличающийся** применением **методов** эксергетического и теплотехнического анализа энергоэффективности, **учетом** химического потенциала полезного преобразования ТЭР, **что позволяет** усовершенствовать методы традиционного термодинамического анализа ХТП.

2. **Предложен** вероятностно-статистический метод прогнозирования спроса на ПГ по различным категориям потребителей, **отличающийся** использованием большого массива данных из проектов развития потребления ПГ с указанием уровня их текущего статуса разработки, **что позволяет** планировать объем ПГ и предполагаемый срок ввода в эксплуатацию объектов ГТС.

3. **Разработан** метод долгосрочного прогнозирования энергопотребления для различных регионов, **отличающийся** применением анализа комплекса демографических показателей и механизмами **учета** удельного энергопотребления, **что позволяет** прогнозировать перспективное энергопотребление.

4. **Предложен** имитационный агентно-ориентированный метод анализа баланса спроса и предложения на ПГ, **отличающийся** использованием агентно-ориентированной модели реального взаимодействия агентов-участников рынка ПГ **и учетом** социально-экономических процессов, **что позволяет** анализировать и прогнозировать реальную ситуацию на рынке спроса ПГ.

5. **Предложена** методология разработки различного вида ИНС-моделей, **отличающаяся** применением представительных обучающих выборок в виде относительно коротких временных рядов и специальных методов построения

аппроксимационных моделей ГТС без процедур переобучения, а также использованием стохастических ИНС, что **позволяет** оценивать доверительные интервалы и повысить достоверность прогноза потребления ПГ. **Выполнен** сравнительный анализ эффективности использования различных видов ИНС-моделей прогнозирования газопотребления.

6. **Разработана** комплексная обучаемая ИНС-модель анализа сложной ГТС, **отличающаяся** использованием для гидравлического и теплового расчета линейных участков ГТС и активных элементов ГТС специальных прикладных программных комплексов анализа сложных ХТС и оптимизации технологических режимов транспорта ПГ, а также **применением** регламентных отраслевых нормативов, что **позволяет** проводить обучение ИНС с использованием различных специальных графических вычислителей (*GPU*-вычислений) и гидравлического калькулятора режимов работы газопроводов, что **обеспечивает** высокую точность расчета параметров течения газа в газопроводах.

7. **Разработан** номограммно-аналитический метод выбора экономически эффективных поставок различных видов газосодержащих ТЭР по новым маршрутам, **отличающийся** применением действующих государственных, отраслевых и корпоративных нормативных документах, **что позволяет** учитывать специфику газовой отрасли в целом и бизнес-процессы трубопроводного транспорта ПГ, производства и реализации поставок различных видов газосодержащего сырья: сжиженного природного газа (СПГ), синтетического жидкого топлива (СЖТ) и метанола.

8. **Разработан** комбинированный метод компьютерного анализа функционирования перерабатывающих производств ПГ, **отличающийся** широким применением цифровых двойников (ЦД) и ИНС, что **позволяет** оперативно, в режиме реального времени, принимать обоснованные организационно-управленческие решения по переработке газового конденсата (ГК) и нефтегазоконденсатной смеси (НГКС) на перерабатывающих производствах ТЭК.

9. **Разработан** метод принятия решений по оценке экономической эффективности инвестиционных проектов развития систем газоснабжения в условиях неопределенности, **отличающийся** учетом специфики газовой отрасли и бизнес-процессов трубопроводной транспортировки ПГ по показателям приведенных затрат, показателям налогообложения, рекомендаций по источникам исходных данных для оперативного расчета стоимости

поставок газа, **учетом** действующих государственных и отраслевых нормативных документов, **что позволяет** определять ресурсоэнергоемкости и прогнозный объем поставки газа потребителям, исходя из спроса на газ и возможных потерь газа при его транспортировке и сжижении.

10. **Разработан** системно-аналитический метод актуализации основных технико-экономических показателей и мониторинга реализации инвестиционных проектов эффективного развития ЕСГ, **отличающийся** применением автоматизированных процедур сбора и переработки больших массивов новых исходных данных применением специальных разработанных шаблонов, процедур расчета технико-экономических критериев – степени обеспечения газом внутренних потребителей и поставок ПГ на экспорт, **что позволяет** обеспечить выполнение плановых отборов из подземных хранилищ газа (ПХГ) и минимизировать условно-переменные затраты.

11. **Предложен** фасетно-иерархический метод автоматизированного составления и решения систем уравнений материально-энергетического баланса аппаратов и подсистем ГТС, представляющих собой сложные ХТС и ХЭТС, **отличающийся использованием** оригинального формализованного понятия - **множество фасетов**, **что позволяет** идентифицировать показатели удельной ресурсоэнергоемкости ЕСГ, места потерь вещества и энергии в системе, а также оценивать влияние найденных потерь на энергоресурсоэффективность и экологическую безопасность всей ЕСГ.

12. **Предложена** методология выбора рациональных комплексных инновационных проектов эффективного развития ЕСГ, **отличающаяся** применением системно-аналитического сценарного подхода к анализу развития мощностей отдельных предприятий и подсистем ЕСГ, **учетом** спроса на ПГ и сроков реализации проектов, **что позволяет** научно обоснованно определять приоритетность разработки и реализации рациональных комплексных инновационных проектов эффективного развития ЕСГ.

13. **Предложен** метод оптимального размещения систем контроля теплотворной способности транспортируемого ПГ, **отличающийся** применением процедур оптимального размещения аналитического и контрольно-измерительного оборудования на участках ГТС и достоверного расчета теплотворной способности ПГ, **что позволяет** формировать направления товарных потоков ПГ для обеспечения оптимального энергоресурсоэффективного распределения ПГ.

Практическая значимость диссертационной работы

1. **Разработан и практически применен** программный комплекс анализа долгосрочной стратегии эффективного развития ТЭК, **который реализует** разработанную методологию принятия решений по организации поставок ПГ в ЕСГ и ИНС-методы прогнозирования эффективного потребления ПГ.

2. **Разработан** специализированный пакет программ (ПП) сбора, обработки и анализа больших массивов данных, **применение которого позволяет** формировать достоверные данные по объемам геологоразведки, добычи и импорта газа, а также рассчитывать соответствующие им экономические показатели.

3. **Разработан** специализированный ПП анализа эффективного развития и функционирования объектов ЕСГ, **практически используемый** для анализа трубопроводных систем энергетики, что **позволяет** определять оптимальные управляющие воздействия в крупномасштабных трубопроводных системах энергетики.

4. **Разработана программа** имитационного ИНС-моделирования объектов ГТС на основе построения ИНС-моделей отдельных объектов ГТС, **которая обеспечивает** решение следующих важных инженерно-технических задач в ГТС: определение достаточности производственных мощностей для удовлетворения спроса на газ при различных вариантах реализации штатных и пиковых режимов работы ЕСГ, определение минимума потребления ТЭР на компрессорных станциях в стационарных и переходных режимах, рассчитать возможность сглаживания неравномерности потребления за счет запаса газа в ГТС и др.

5. **Разработана программа** НС-моделирования и оптимизации крупномасштабной трубопроводной системы, **которая используется** при инжиниринге бизнес-процессов управления функционированием и развитием крупных ГТС.

6. **Разработан комплекс программ** дистанционного мониторинга состояния территориально-распределенных объектов сложной углеводородной ГЦ.

7. **Практически использована** методология принятия управленческих решений по выбору эффективной организации поставок ПГ для оптимальной диверсификации рынка сбыта ПГ, оценки экономической эффективности различных способов поставки ПГ до потребителей с учетом возможности его преобразования в другие формы и замещения другими видами ТЭР или сырья на основе формирования денежных потоков, капитальных вложений, эксплуатационных затрат, амортизационных отчислений, налогов и сборов и др.

8. **Практически использована** методика принятия системно-аналитических решений по выводу из эксплуатации избыточных газотранспортных мощностей с рациональным использованием основных производственных фондов при транспорте газа и учете долгосрочных прогнозных потоков по ГТС ЕСГ.

9. На основе предложенных организационно-технических решений **выполнен расчет** капитальных вложений в объекты добычи и транспорта газа при раздельных поставках в ГТС этансодержащего газа и расчета стоимости на объектах добычи, транспортных затрат и цен на этансодержащий газ.

10. **Предложен способ** уточненной оценки показателей качества ПГ при его транспортировке по ГТС, **который позволяет** выявить фрагменты ГТС, где учет взаимосвязанности замеров не приводит к уточнению оценок (из-за недостаточности количества приборов на фрагменте), который **пригоден** для расчета любого показателя качества ПГ и для решения задач компаундирования нефтей.

11. **Практически использована** методика формирования перспективного пикового баланса газа по ЕСГ России на 10-летний период для заблаговременного принятия организационно-управленческих решений, по наиболее эффективному прохождению периода пикового потребления газа; разработана стратегия обеспечения надежного газоснабжения потребителей и выполнения контрактных обязательств в условиях пикового спроса на газ.

12. Материалы диссертационной работы использованы при ежегодной актуализации учебных планов и основных образовательных программ на кафедре Логистики и экономической информатики РХТУ им. Д.И. Менделеева для обучения магистрантов по направлению 18.04.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» по магистерской программе «Энергоресурсоэффективные высоконадежные производства и ЦП нефтегазохимического комплекса», а также при обучении аспирантов по направлениям: 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» и 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

13. Материалы диссертационной работы использованы в учебном процессе филиала кафедры экономики и управления в ТЭК «Государственного университета управления» при преподавании специальных дисциплин: бакалавриата по направлению подготовки 38.03.02 «Менеджмент» образовательной программы «Менеджмент

организаций ТЭК»; магистратуры по направлению подготовки 38.04.02 «Менеджмент» образовательной программы «Топливно-энергетический бизнес».

Теоретическая значимость научно-квалификационной работы состоит в разработке научно обоснованной методологии и интеллектуально-вычислительных инструментов принятия системно-аналитических решений по энергоресурсоэффективному развитию ЕСГ, что вносит определенный вклад в развитие теории сложных производственных организационно-экономических систем, к которым относятся ГТС, ХТС и теплоэнергетические системы.

Достоверность предложенных научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена корректным использованием общих принципов системного анализа, методов теории ИИ, а также многочисленными вычислительными экспериментами, корректностью математической обработки больших массивов статистических данных и результатами практического применения проведенных научных исследований для оценки эффективности реализуемых инвестиционных проектов развития ЕСГ, при разработке специальных программ развития ПАО «Газпром».

Положения, выносимые на защиту

1. Методология анализа структуры, режимов функционирования ЕСГ как уникальной комплексной производственно-организационно-экономической системы, состоящей из совокупности взаимосвязанных в ЦП подсистем добычи и транспортировки ПГ, переработки, хранения и распределения ПГ.

2. Методология принятия системно-аналитических решений по организации оценке энергоресурсоэффективных поставок ПГ в ЕСГ с учетом спроса на ПГ в различных регионах.

3. Методология разработки различных видов ИНС-моделей прогнозирования эффективного потребления ПГ с учетом состояния газового рынка и экономической эффективности использования ПГ.

4. Методы комплексного анализа объектов магистральных газотранспортных систем с применением регрессионных моделей, ИНС-моделей и цифровых двойников.

5. Фасетно-иерархический метод автоматизированного анализа и интеллектуально-вычислительные инструменты оптимизации эффективности ГТС с применением различных видов ИНС-моделей.

6. Методы принятия системно-аналитических решений по выбору рациональных

инновационных проектов эффективного развития ЕСГ.

7. Методология разработки архитектуры и режимов функционирования комплекса пакетов программ принятия системно-аналитических решений по эффективному развитию ЕСГ.

Практическая реализация результатов научно-квалификационной работы подтверждается разработкой автором основных положений ряда важнейших программных и нормативных документов ПАО «Газпром».

Общий экономический эффект от практической реализации на предприятиях ПАО «Газпром» части предложенных в диссертации оригинальных научно-технологических решений составил 1,4 млрд руб.

Апробация работы и публикации. Научные результаты диссертации использованы при подготовке докладов на более чем 250 международных и отечественных научно-технических конференциях, совещаниях в Министерстве энергетики РФ и ПАО «Газпром».

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных научно-технических конференциях и совещаниях:

Международный технологический конгресс «Новые высокие технологии газовой, нефтяной промышленности, энергетики и связи» (Томск, 2006); Конференция к юбилею ООО «НИИгазэкономика» «Устойчивое развитие и максимизация прибыли» (Москва, 2017); Конференция к юбилею ООО «НИИгазэкономика» «Критерии подобия при анализе макроэнергетических систем» (Москва, 2017); VIII Международная научно-техническая конференция «Прогнозирование величины запаса газа в ГТС на основе статистической информации» (Москва, 2019); VIII Международная научно-техническая конференция «Проблемы оценки изменения состава природного газа при его транспортировке по ЕСГ РФ» (Москва, 2019); VII Международная научно-техническая конференция «Моделирование, оптимизация и управление режимами работы ЕСГ России с применением технологий искусственного интеллекта» (Москва, 2021); 24th World Gas Conference. “Methodical approaches to drawing up strategy of gas industry integrated development in Latin America” (Buenos Aires, 2009); 18-е заседание Всероссийского научного семинара «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем» ФГБУН Институт систем

энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН «Опыт и перспективы применения математического аппарата, вычислительных алгоритмов и компьютерных технологий машинного обучения в задачах исследования функционирования и развития систем газоснабжения» (Иркутск, 2022).

Соответствие паспорту специальности. В диссертационной работе решены научная проблема и совокупность научно-технических задач, соответствующие следующим пунктам области исследований специальности **2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»**:

ппс.1 «Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»;

ппс.3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и ИИ»;

ппс.5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и ИИ»;

ппс.9 «Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов»;

ппс.10 «Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах»;

ппс.17 «Прикладные статистические исследования, направленные на выявление, измерение, анализ, прогнозирование, моделирование складывающейся конъюнктуры и разработки перспективных вариантов развития сложных систем».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 90 печатных работ, в том числе 16 публикаций в журналах, индексируемых в международных базах данных; 6 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК по специальности; 8 свидетельств на программы для ЭВМ; 2 патента; 6 монографий.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 210 наименований и 2 приложений. Диссертация содержит 363 страницы, 84 рисунка и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научной темы диссертации; сформулированы цель и основные научно-технические задачи исследования; изложены научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В главе 1 «Современное состояние научных исследований по методам системного анализа и планирования развития топливно-энергетического комплекса» изложен аналитический обзор современных научных исследований по системному анализу и стратегическому планированию развития ТЭК; обоснована важная социально-экономическая роль эффективного развития ЕСГ в реализации проектов технологического лидерства и технологического суверенитета РФ. Приведены результаты применения методов системного анализа и теории ИИ и модели ИНС для решения ряда задач анализа и оптимизации предприятий ТЭК.

Научно обоснована необходимость проведения современных глубоких исследований по разработке методов и интеллектуально-вычислительных инструментов принятия решений на этапах анализа и проектирования ЕСГ с применением различных видов обучаемых ИНС и ЦД, что позволяет успешно решать актуальные задачи цифровой трансформации всех предприятий ЕСГ и ТЭК в целом, включая задачи поиска и разведки месторождений ПГ, добычи ПГ, транспортировки ПГ, распределения ПГ, переработки ПГ в продукты с высокой добавленной стоимостью.

Глава 2 «Методология оценки эффективного спроса на природный газ» содержит методические подходы к формированию прогноза энергопотребления и спроса на углеводородное сырье.

Большой объем, неструктурированность и нечеткость исходной информации, а также плохая формализуемость методов ее обработки не позволяют использовать для построения прогнозов газопотребления только классические математические модели, а требуют применения новых методов в различной модификации.

Стратегия развития ЕСГ является основополагающим инструментом оптимизации и синхронизации развития потребителей и производителей ПГ, территориальной инфраструктуры. Спрос на ПГ, возможности добычи ПГ и объемы финансирования являются ограничениями при формировании оптимальных показателей эффективного развития ЕСГ.

Ключевой задачей оптимального развития ЕСГ является обоснование наиболее

эффективного баланса между добычей и потреблением газа и соответствующего ему совместного развития всех подсистем ЕСГ, по критерию максимума экономической эффективности при условии обеспечения надежности поставок ПГ, с учетом внешней среды.

Предложено оценивать эффективность использования ТЭР в ЕСГ совокупностью трех показателей: газосбережение, энергосбережение и ресурсосбережение. Разработана концептуальная модель метода принятия системно-аналитических решений по повышению эффективности потенциала использования ПГ в регионах ЕСГ (см. Рисунок 1).

Метод основан на ранжировании регионов-потребителей ЕСГ и позволяет контролировать изменение потребления ПГ не только за счет переходов на альтернативные ТЭР, но и за счет применения новых энергоресурсосберегающих ХТС переработки ПГ в ЕСГ.

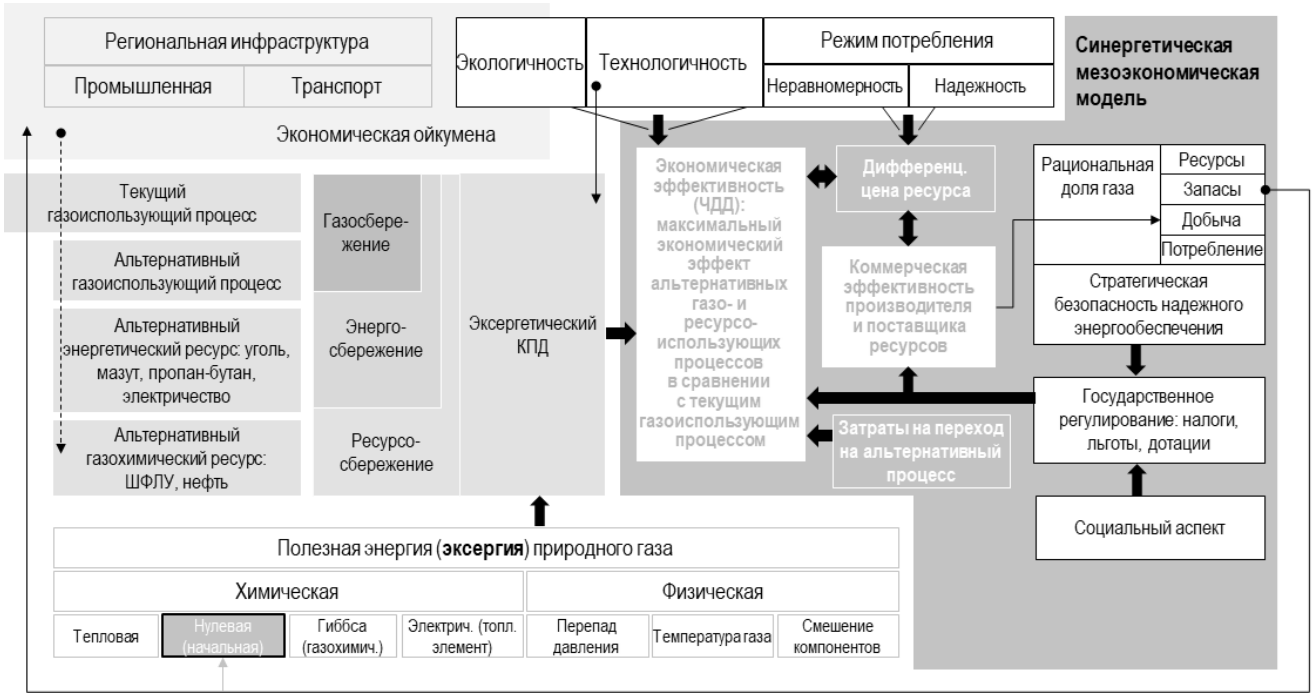


Рисунок 1 – Концептуальная модель принятия системно-аналитических решений по повышению эффективности потенциала использования ПГ

Изложен оригинальный вероятностно-аналитический метод прогнозирования спроса на ПГ в ЕСГ с учетом различных категорий инвестиционных проектов потребления газа и классификацией основных категорий потребителей ПГ. Уточненный спрос на ПГ предложено прогнозировать с использованием метода Монте-Карло для имитационной дискретной модели распределения вероятностей реализации проекта

потребления ПГ и сдвига его во времени.

Изложен метод прогнозирования перспективного энергопотребления для различных регионов (см. Рисунок 2) при планировании долгосрочного развития ЕСГ на основе планирования перспективных балансов и потоков в ЕСГ как на уровне отдельного региона (страны), так и в мировом масштабе, с учетом неопределенности долгосрочного энергопотребления. Обоснованы показатели, определения и сопоставления «энергетической зрелости» любого региона. Метод использует процедуры долгосрочного прогнозирования на основе специальных демографических показателей удельного энергопотребления.

Предложен по указанным демографическим показателям критерий подобия регионов ($К_П$) (2.1):

$$К_п = \left(S_W^{\left(\frac{D_5}{\langle D_5 \rangle}\right)}\right)^4 \cdot S_U^{-0,05}. \qquad (2.1)$$

Где S_w – доля населения в возрастном диапазоне от 15 до 64 лет; S_u – доля городского населения; D_5 – детская смертность до 5 лет на 1000 новорожденных.

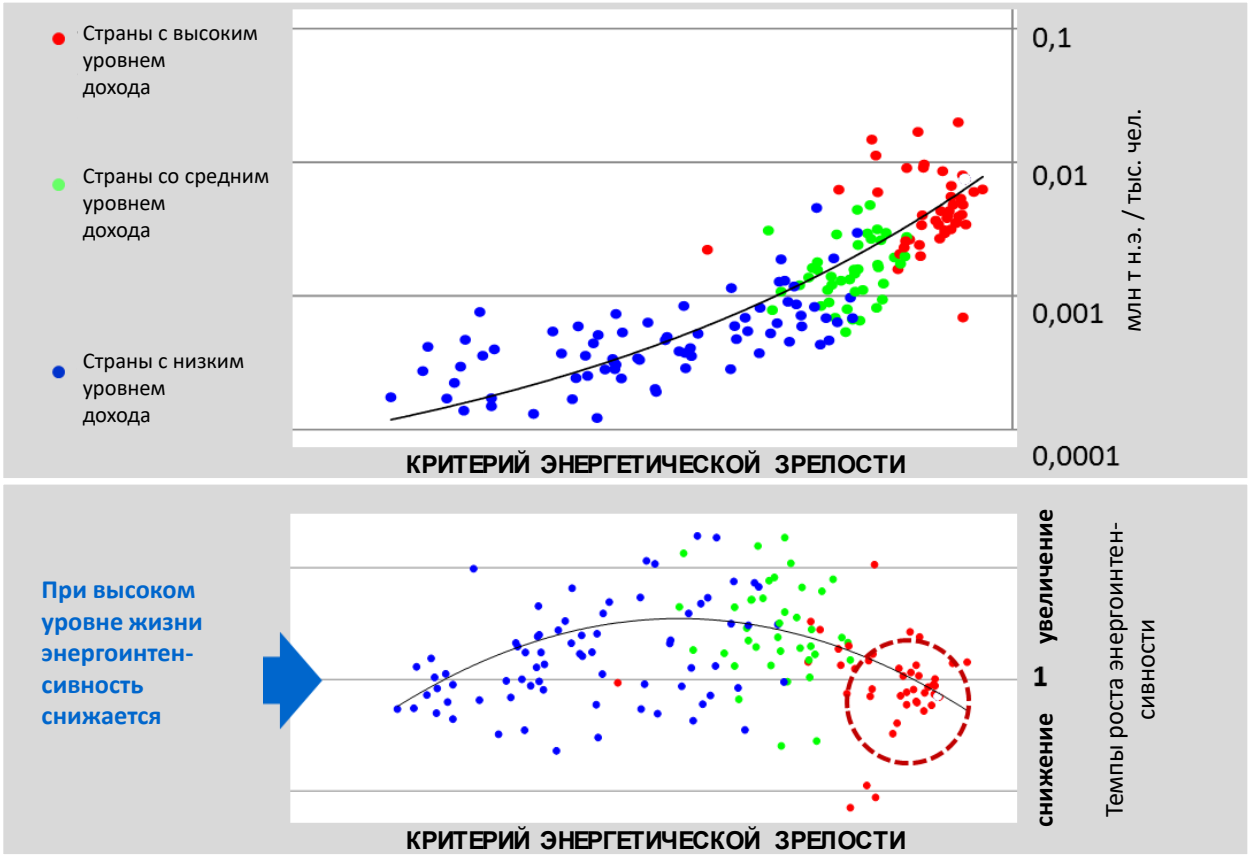


Рисунок 2 – Метод прогнозирования перспективного энергопотребления для различных регионов

Предложен имитационный агентно-ориентированный метод оценки эластичности спроса на ПГ, учитывающий поведение участников рынка потребителей и дифференциацию цен на ПГ при сезонной неравномерности спроса. Метод позволяет определять перспективный спрос на ПГ при разработке программ социально-экономического развития регионов, при разработке оптимальных региональных топливно-энергетических балансов (см. Рисунок 3).

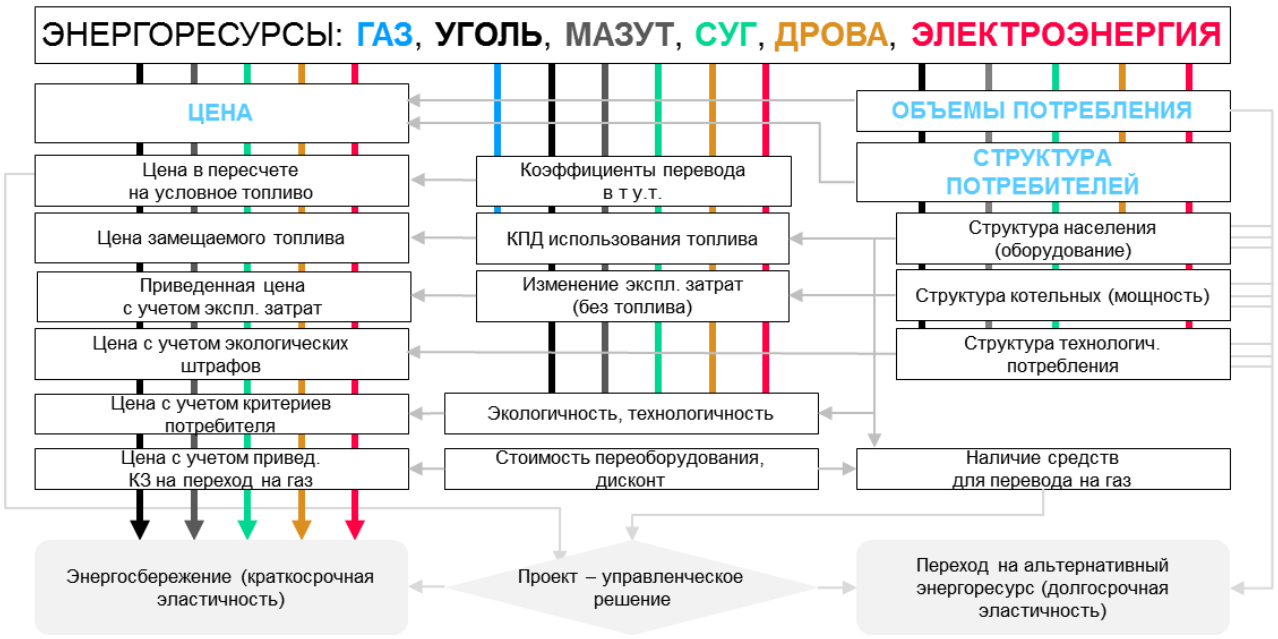


Рисунок 3 – Имитационный агентно-ориентированный метод оценки спроса на ПГ

Совокупность функций спроса при различных соотношениях цен на газ и альтернативные виды ТЭР (кривые эластичности по цене газа) могут быть построены с применением специального алгоритма параметризации цены ПГ. Предложена модель эффективного поведения агентов – типовых потребителей энергоресурсов:

$$C_{ij}^{tr} = C_{ij}^{cr} \cdot K_{ij}^{t} + \Delta R_{ij} + \Delta E_{ij} + C_{ij}^{K} \cdot K^{cn} - \frac{C_{ij}^{in}}{P_i}, \quad (2.2)$$

$$Q(C) = \sum_{i=1} \sum_{j=1, C_{ij}^{tr} > C} S_{ij}, \quad (2.3)$$

где C^{tr} – уровень кривой безразличия перехода на газ i-го потребителя с j-го энергоресурса, руб./т у. т.; C^{cr} – текущая цена реализации, руб./т у. т.; K^t – коэффициент роста энергетического КПД при переходе на газ; ΔR – снижение эксплуатационных

затрат (без учета стоимости топлива) при переходе на газ, руб./т у. т.; ΔE – снижение экологических платежей, руб./т у. т.; C^K – эффект топливозамещения, руб./т у. т.; K^{cn} – коэффициент учета предпочтений потребителя; C^{in} – капитальные вложения при переходе на газ, руб./т у. т.; P – простой срок окупаемости, лет; S – текущая доля потребления энергоресурсов по газифицируемым потребителям; $Q(C)$ – функция спроса на газ (доля от максимального проектного потребления) со стороны газифицируемых потребителей в зависимости от цены реализации газа.

Параметрическое решение модели (2.2)–(2.3) при выборе объемов потребления газа определяет кривую эластичности спроса на газ в зависимости от цены с учетом коммерческого риска (см. Рисунок 4).

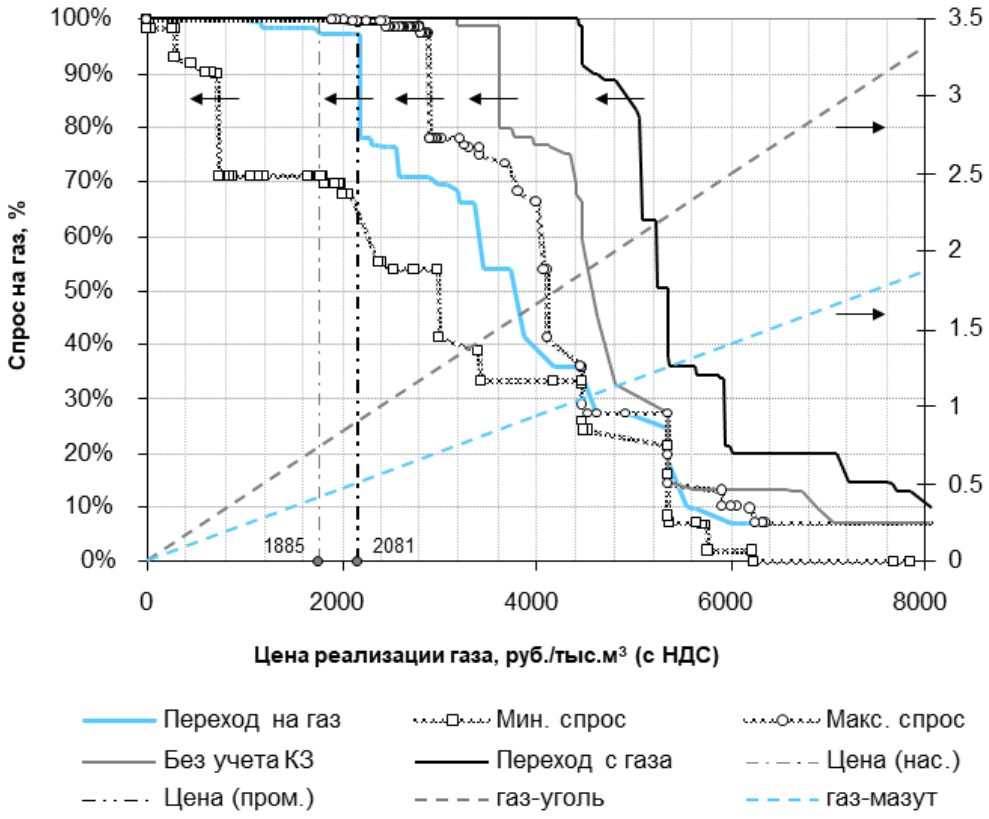


Рисунок 4 – Результирующие графики прогноза влияния цены газа на спрос

Глава 3 «Методы разработки нейросетевых моделей прогнозирования потребления природного газа» рассмотрены подходы к прогнозированию спроса на энергоресурсы с применением нейросетевых моделей. ИНС используют последовательность нелинейных слоев из нейронов для получения представления

исходных признаков в пространстве иной размерности, позволяющем использовать эту информацию для ее декодирования и получения из декодированного сигнала прогнозных значений. Исследования и обучение нейросетей, проведенные в настоящей работе, показали, что для прогнозирования газопотребления могут быть применимы несколько альтернативных архитектур нейронных сетей:

- прямого распространения или иначе, многослойный персептрон;
- рекуррентные нейронные сети;
- сверточные нейронные сети;
- гибридные модели, использующие различные сочетания нейронных сетей.

В работе проведен анализ различных нейросетевых архитектур, отмечены особенности их применения для прогнозирования потребления газа.

Разработаны ИНС для прогнозирования временных рядов (ВР), отображающих режимы функционирования ГТС, которые используются для решения широкого круга задач прогнозирования в ТЭК и в ЕСГ, в том числе для прогнозирования энергопотребления, динамики региональных и мирового энергетических рынков.

Использование ИНС для прогнозирования ВР в ТЭК позволяет сделать следующие выводы: ИНС реализуют достаточно гибкие и сложные функциональные процедуры преобразования входных данных в выходные, имея при этом относительно несложную структуру; ИНС часто имеют недоступную для других методов точность и обладают большой гибкостью в настойке гиперпараметров; ИНС работают как с числовыми, так и с категориальными данными.

Обоснована возможность применения для прогнозирования газопотребления в ЕСГ нескольких альтернативных видов архитектур ИНС: ИНС прямого распространения (Feed Forward Network, FFN) или многослойный персептрон (Multilayer Perceptron, MLP); рекуррентные ИНС (Recurrent Neural Networks, RNN); сверточные ИНС (Convolutional Neural Networks, CNN); гибридные ИНС, использующие комбинирование различных видов ИНС (см. Рисунок 5).

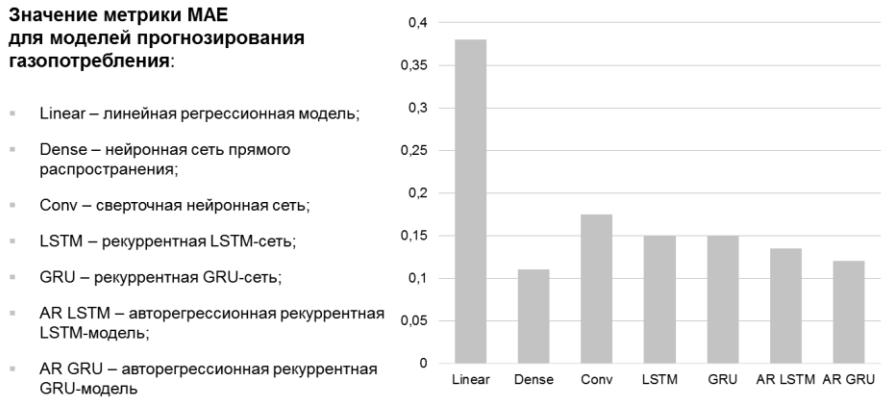


Рисунок 5 – Сравнительный анализ эффективности использования различных типов ИНС-моделей для прогнозирования газопотребления

Сравнительный анализ показал, что для различных рынков ПГ могут быть применены различные ИНС-модели, обеспечивающие наилучшее качество прогноза. Сверточная ИНС и обычные рекуррентные ИНС по показателям качества уступили другим моделям, однако значительно превзошли базовую линейную модель.

Разработанные методические основы построения и использования ИНС позволяют решать большой круг практических задач развития ТЭК, в частности, преодолеть проблемы имитационно-аналитического моделирования ЦД.

Глава 4 «Интеллектуально-вычислительные методы анализа и оптимизации эффективности газотранспортных систем с применением искусственных нейронных сетей» содержит изложение формализованной постановки задачи оптимизации эффективности ГТС с учетом иерархических уровней отдельных газотранспортных предприятий (региональных ГТС) и особенностей расчета значений управляющих переменных заданного режима транспорта ПГ при соблюдении для всех анализируемых объектов контролируемых технологических ограничений. В моделях предприятий отражены значимые переменные функционирования ЕСГ.

Обоснована возможность решения следующих конкретных задач оптимизации эффективности ЕСГ: оптимальное планирование затрат ТЭР при транспорте газа, в том числе при различных объемах ремонтных работ в ЕСГ; идентификация потоков газа в ГТС на границах смежных ГТС, на которых отсутствуют штатные средства измерения расхода газа; планирование потоков газа для обеспечения пикового баланса газа в ЕСГ, в том числе с учетом запаса газа в ГТС; оптимизация параметров газового потока (давление, расход газа) на границах ГТС газотранспортных предприятий; другие задачи

анализа технологических режимов течения газа в ГТС ЕСГ в целом.

Математическая постановка задачи оптимизации эффективности имеет вид нелинейного невыпуклого программирования.

Разработана комплексная ИНС-модель ГТС (см. Рисунок 6) для решения различных задач анализа ГТС, основанная на применении методов регрессионного анализа, методов классификации и кластеризации, методов моделирования ВР, методов стохастического программирования и др.



Рисунок 6 – Блок-схема структуры комплексной ИНС-модели ГТС

Решение задачи оптимизации осуществляется с помощью различных методов нелинейного невыпуклого программирования.

Характерной особенностью разработанной комплексной ИНС-модели является универсальность аппроксимирующих функций и быстродействие для пространств высокой размерности.

Предложена методика организации вычислительных экспериментов по автоматизированному обучению комплексной ИНС-модели ГТС. Для обучения ИНС-модели линейного участка ГТС разработана архитектура ИНС, состоящая из трех полносвязных внутренних слоев с 32 нейронами в каждом слое. В качестве функции потерь используется среднеквадратичное отклонение (*MSE*). Для оценки качества прогнозов, выполняемых ИНС, применяют метрику среднего абсолютного отклонения (*MAE*). Обучающая выборка состоит из более 10^5 обучающих примеров, тестовая выборка

имеет 2×10^3 примеров.

Для обучения ИНС-модели участка ГТС разработана архитектура ИНС, аналогичная модели линейного участка, но с увеличенным до 256 числом нейронов во внутренних слоях ИНС. Обучающая выборка включает в себя 5000 примеров, тестовая выборка – 500 примеров.

Результаты вычислительных экспериментов показали, что предложенная структура комплексной ИНС обеспечивает высокую точность аппроксимации зависимости между параметрами течения газа в участке ГТС. Число эпох обучения, в течение которых ИНС-модель достигает высокой точности, составляет около 10^4.

Изложены методические основы оптимизации крупной ГТС с использованием комплекса ИНС-моделей, которые апробировались при решении задач оптимизации эффективности крупной ГТС. Результаты прогнозов с применением разработанных ИНС-моделей верифицированы большими данными из расчетно-технологических паспортов соответствующих участков ГТС.

Изложен фасетно-иерархический метод автоматизированного составления и расчета систем уравнений материально-энергетического баланса произвольных аппаратов и подсистем ГТС, представляющих собой сложные ХТС и ХЭТС. Метод позволяет идентифицировать места потерь ТЭР, а также оценивать влияние потерь на энергоресурсоэффективность всей ХЭТС.

Предложенный метод практически применен для составления классификационно-обучающих выборок ИНС, для обработки массивов больших данных и при обучении ИНС, так как позволяет автоматически сформировать ключевые слова или метрики по соответствующим фасетам.

Разработан пакет прикладных программ (ППП), реализующий фасетно-иерархический метод, который может быть использован как интеллектуальный интерфейс «ИИ-агент» для работы пользователя инженера технолога со стандартными комплексами программ компьютерного моделирования ХЭТС (см. Рисунок 7).

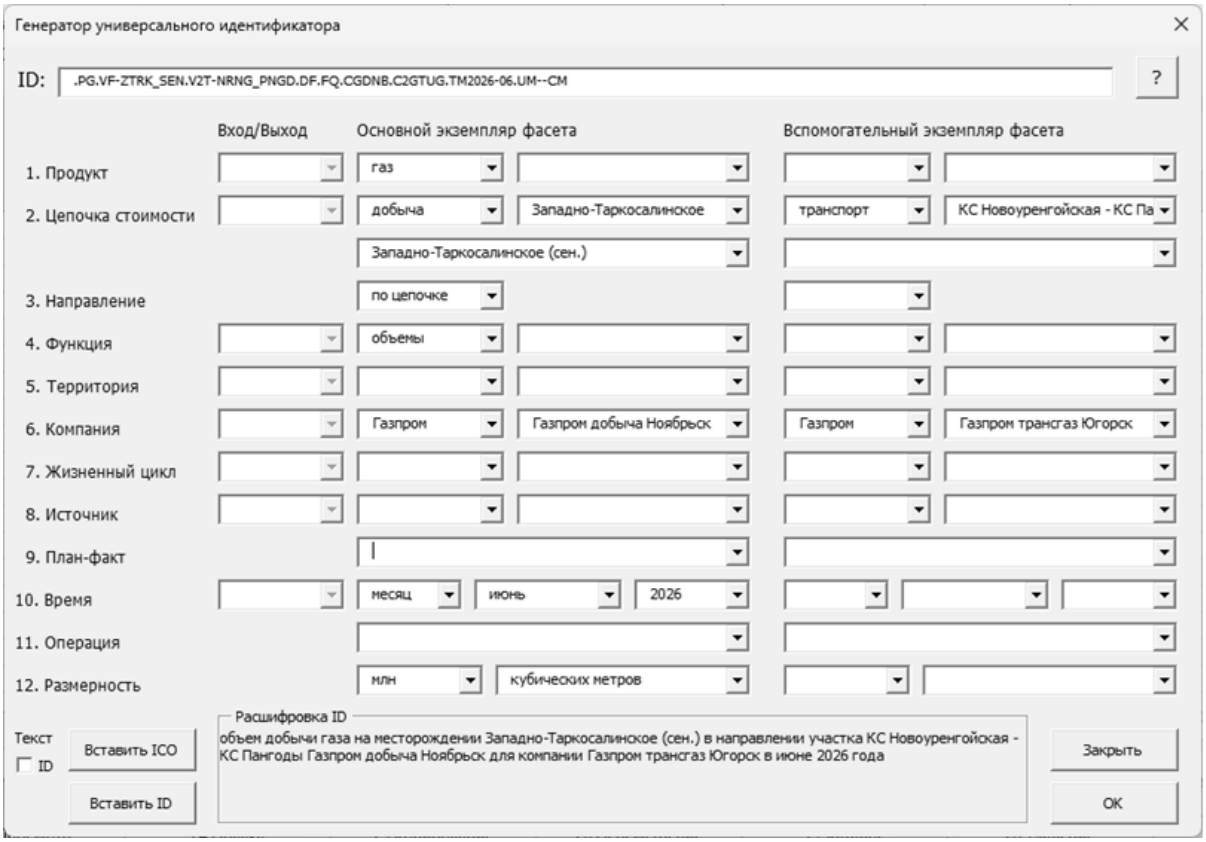


Рисунок 7 – Метод автоматизированного фасетно-иерархического составления материально-энергетических балансов сложных ХЭТС

В главе 5 «Методологические основы принятия решений по выбору инвестиционных проектов эффективного развития единой системы газоснабжения» изложен метод оценки экономической эффективности инвестиционных проектов поставок газа по ГТС по новым экспортным направлениям, который учитывает специфику газовой отрасли и бизнес-процесса трубопроводной транспортировки газа.

Изложен оригинальный номограммно-аналитический метод выбора экономически эффективных поставок различных видов газосодержащего сырья по новым маршрутам в различных формах (см. Рисунок 8).

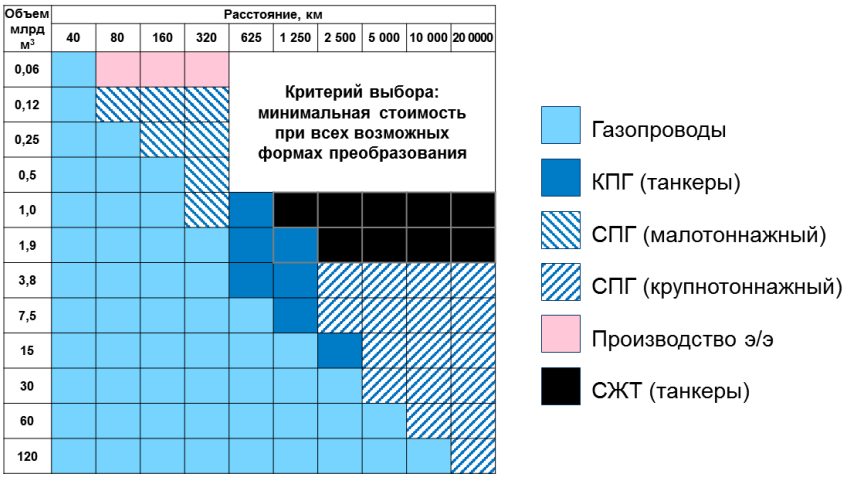


Рисунок 8 – Номограммно-аналитический метод выбора эффективных маршрутов поставки энергоресурсов

Разработан метод компьютерного анализа газоперерабатывающих производств с применением имитационного многоагентного моделирования и ИНС, который позволяет подойти к решению большого спектра практических задач (см. Рисунок 9).

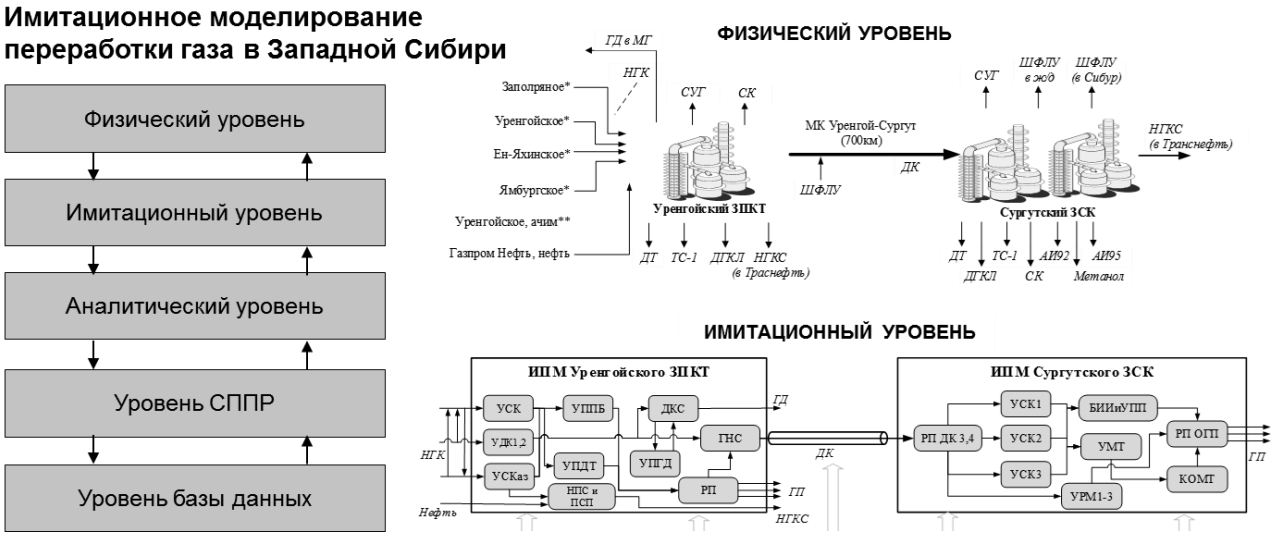


Рисунок 9 – Метод компьютерного анализа газоперерабатывающих производств с применением ЦД и ИНС

Изложены методологические основы разработки комплексных инвестиционных проектов эффективного развития ЕСГ, базирующиеся на применении системно-аналитического сценарного подхода к развитию мощностей отдельных предприятий и подсистем ЕСГ с учетом спроса на ПГ и сроков реализации проектов.

Проведен системный анализ инвестиционных проектов, определены информационные потоки между различными объектами ГТС, предложена периодичность процедуры актуализации основных технико-экономических показателей (ТЭП) и порядок их мониторинга (см. Рисунок 10).

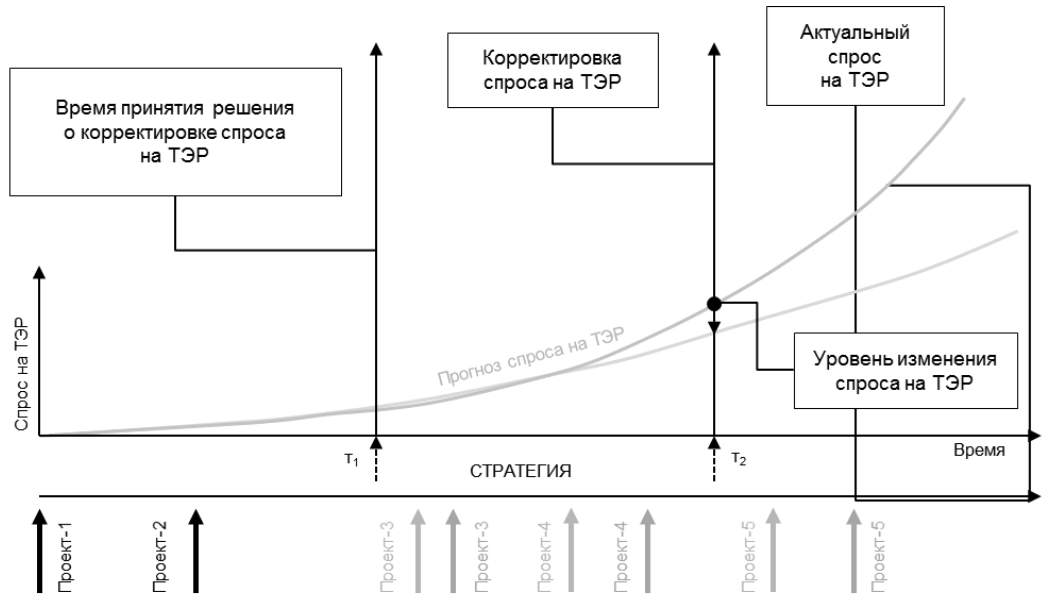


Рисунок 10 – Системно-аналитический метод актуализации основных ТЭП и мониторинга реализации проектов развития ЕСГ

Методология позволяет учитывать неопределенность информации, сочетает классический подход к дисконтированию затрат с использованием интегральной вероятности, что позволяет привести все рассматриваемые проекты к единому базису, сделать сопоставимыми денежные потоки по различным инвестиционным проектам и выполнить корректную операцию сложения при формировании единого инвестиционного портфеля.

В главе 6 «Разработка комплекса пакетов программ принятия системно-аналитических решений по эффективному развитию единой системы газоснабжения» изложены описания архитектуры и режимов функционирования программного комплекса анализа и долгосрочной стратегии эффективного развития ТЭК (см. Рисунок 11), который реализует разработанную методологию принятия решений по организации поставок ПГ в ЕСГ и ИНС-методы прогнозирования эффективного потребления ПГ, предложенные в главе 3.

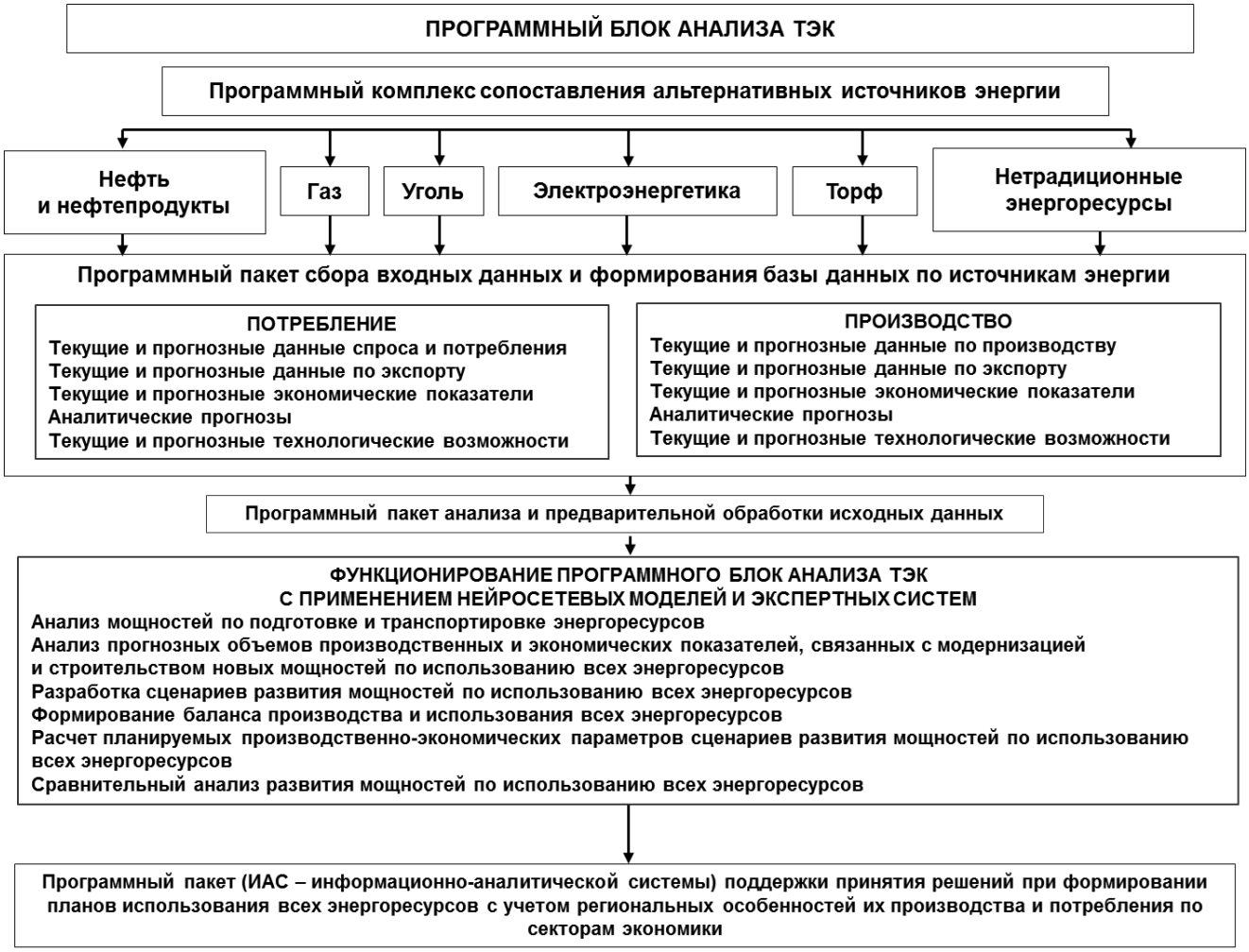


Рисунок 11 – Архитектура программного комплекса анализа и долгосрочной стратегии эффективного развития ТЭК

Разработан специализированный ПП анализа эффективного развития и функционирования ЕСГ, который реализует теоретические методы, изложенные в главе 5. ПП реализует операции сбора, обработки и анализа больших массивов данных, а также расчет обобщенных ТЭП эффективности ЕСГ.

Разработаны специализированные ПП анализа функционирования и развития объектов ЕСГ, которые реализуют интеллектуально-вычислительные методы анализа и оптимизации эффективности ГТС с применением ИНС, изложенные в главе 4. Указанные ПП позволяют сбалансировать ГТС и подобрать оптимальный режим работы ГТС.

Разработаны архитектуры и режимы функционирования программы имитационного НС-моделирования отдельных объектов ГТС, которые необходимы для формирования ИНС-моделей крупномасштабных ГТС. Разработанная с применением

этих программ компьютерная модель ГТС решает важные инженерно-технические задачи.

В результате автоматизированного решения этих задач определены управляющие воздействия, минимизирующие целевую функцию – потребление ТЭР на выполнение работы по транспортировке ПГ при пиковых режимах работы ЕСГ в зимние периоды.

Разработана программа ИНС-моделирования и оптимизации крупномасштабной трубопроводной системы для компьютерного анализа и оптимизации технологических режимов функционирования крупномасштабных ГТС. Указанная программа реализует теоретические методы, изложенные в главе 4.

В программе реализованы операции формирования расчетной комплексной ИНС-модели ГТС на основе ИНС-моделей отдельных объектов ГТС. Комплексная ИНС-модель всей ГТС как «экспресс модель» ГТС имеет около 250 миллионов параметров, которые заранее должны быть определены при обучении ИНС-моделей отдельных участков ГТС. За счет большого количества параметров ИНС достигается достаточная точность аппроксимаций гидравлических характеристик участков ГТС.

Разработаны архитектуры и режимы функционирования комплекса программ дистанционного мониторинга состояния территориально-распределенных объектов сложной углеводородной ГЦ, состоящей из трех программ: 1) дистанционный мониторинг технологических параметров сложной углеводородной ГЦ; 2) мониторинг состояния территориально-распределенных объектов сложной углеводородной гидравлической цепи; 3) удаленный контроль параметров сложной углеводородной ГЦ магистральной ГТС. Программа может активно применяться в газораспределительных организациях ЕСГ для повышения надежности и безопасности работы оборудования.

В главе 7 «Практическое применение разработанных методологии и интеллектуально-вычислительных инструментов принятия решений по энергоэффективному развитию единой системы газоснабжения» подробно описано практическое применение методологии выбора эффективной организации поставок ПГ, которое обеспечило оптимальную диверсификацию рынка сбыта ПГ в результате расширения географии присутствия ПАО «Газпром» и позволило решить актуальную задачу эффективного развития ЕСГ.

Указанное практическое применение осуществлялось при реализации программы развития ПАО «Газпром» – разработка и внедрение Программы создания в Восточной

Сибири и на Дальнем Востоке единой системы добычи, транспортировки газа и газоснабжения с учетом возможного экспорта газа на рынки Китая и других стран Азиатско-Тихоокеанского региона (см. приложение В.1 диссертации). Для решения задач газоснабжения применены разработанные методы оценки эластичности спроса (см. раздел диссертации 2.4).

Практически применена методика вывода из эксплуатации избыточных газотранспортных мощностей (см. разделы диссертации 2.1 и 5.5) на основе рационального использования основных производственных фондов в транспорте газа с учетом долгосрочных прогнозных потоков по ГТС.

Практически применена разработанная методика оптимизации затрат по ГТС при условии обеспечения перспективного спроса на ПГ, состоящая из следующих основных этапов: формирование потоков газа по ГТС на системном уровне в годовом и пиковом разрезах; компьютерный анализ и оптимизация гидравлических режимов на основе потоков газа по ГТС; проверка обеспечения поставок газа при пиковых режимах газопотребления с учетом изменения запасов газа в газопроводах. На основании методики формирования пикового баланса ежегодно последовательно проводятся расчеты пиковых балансов по различным статьям: пиковые объемы поставок газа потребителям РФ в зоне ЕСГ; объемы поставок газа в дальнее зарубежье; объемы поставок газа в ближнее зарубежье; затраты на собственные нужды и технологические потери; объемы поставок газа для производства СПГ, закачка в пласт; пиковые объемы добычи газа Группой Газпром; пиковая добыча газа зависимыми компаниями; пиковая добыча газа независимыми и нефтяными компаниями; объемы импорта газа; оценка расчетной даты холодной пятидневки; пиковая производительность ПХГ; оценка резерва или дефицита мощностей пикового баланса.

Практически реализованы рекомендации по организации раздельной транспортировки этансодержащего газа с повышенным содержанием C_{2+} до мест переработки, обусловленная наличием значимых запасов этана, пропана, бутана и др., их высокой добавленной стоимостью (см. приложение Б.1 диссертации). По месторождениям выполнена прогнозная оценка добычи этансодержащего газа на период до 2050 года.

Разработаны рекомендации по использованию существующих и строительству новых трубопроводных мощностей в ЕСГ.

На основе разработанного метода оценки и оптимизации потенциала системной эффективности инновационных проектов (см. Рисунок 12) по различным направлениям деятельности газового бизнеса (см. раздел диссертации 5.5) предложено по разнице значений текущего удельного показателя и потенциала лучших практик масштабировать эффект через перспективную динамику развития компании и отрасли (см. приложение В.4 диссертации).

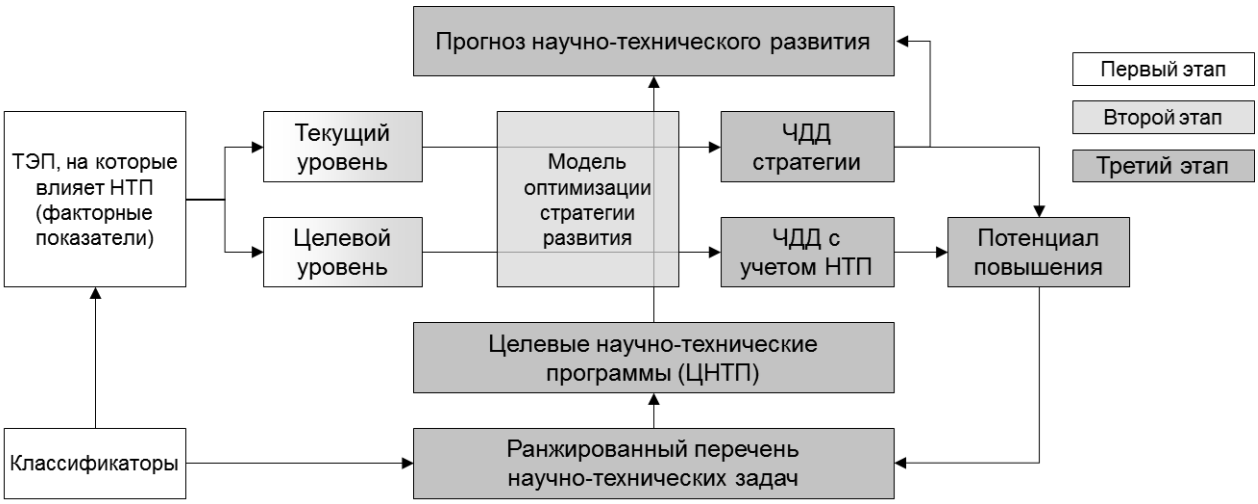


Рисунок 12 – Оценка потенциала системной эффективности инноваций

Предложена методология уточненной оценки показателей качества ПГ при транспортировке по ГТС (патент RU 2733969 C1 «Способ уточненной оценки показателей качества природного газа при его транспортировке по газотранспортной системе»), учитывающая многокомпонентный по химическому составу ПГ, поступающий на газоперерабатывающие заводы и ПХГ. При оперативном управлении ГТС необходимо учитывать значения показателей качества на каждом объекте ГТС, прежде всего для крупных потребителей и пунктов экспорта ПГ, что имеет важное значение для выбора рациональных инвестиционных проектов эффективного развития ЕСГ и управления энергоресурсоэффективностью ГТС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Дана характеристика, определены основные свойства и режимы функционирования ЕСГ как комплексной производственной организационно-экономической системы.

2. Разработана **методология оценки эффективного спроса на ПГ**, **включающая** методы системно-аналитической оценки потенциала эффективного потребления ПГ в ЕСГ РФ на основе демографических показателей энергетической зрелости; вероятностно-статистический метод прогнозирования спроса на ПГ для различных категорий потребителей; метод прогнозирования перспективного энергопотребления для различных регионов и имитационный агентно-ориентированный метод оценки спроса на ПГ.

3. Обоснованы основные научные предпосылки применения методов теории ИИ для прогнозирования развития эффективного потребления ПГ в ЕСГ, проведен системный анализ специфики применения ИНС для прогнозирования развития газового рынка. Предложены методологические основы разработки различных видов ИНС-моделей для прогнозирования эффективного потребления ПГ в различных регионах и отдельных странах. Выполнен системный анализ эффективности применения различных видов ИНС-моделей прогнозирования газопотребления (ИНС-модели прямого распространения, рекуррентные ИНС-модели, сверточные ИНС, авторегрессионные рекуррентные модели).

4. Предложен комбинированный метод компьютерного анализа функционирования газоперерабатывающих производств с применением цифровых двойников и ИНС.

Разработана математическая постановка задач анализа и оптимизации эффективности газотранспортной системы ЕСГ с использованием комплексной обучаемой ИНС-модели сложной газотранспортной системы. Разработаны интеллектуально-вычислительные методы оптимизации крупной газотранспортной системы с использованием комплекса ИНС-моделей; реализован номограммно-аналитический метод выбора экономически эффективных новых маршрутов поставки различных видов производных от ПГ энергоресурсов.

5. Разработан фасетно-иерархический метод автоматизированного составления материально-энергетических балансов сложных химико-энерготехнологических систем переработки ПГ.

6. Предложены методологические основы принятия решений по выбору рациональных инвестиционных и инновационных проектов эффективного развития ЕСГ в условиях неопределенности, включающие методы оценки экономической эффективности инвестиционных проектов поставок ПГ трубопроводными системами по новым направлениям, метод выбора рационального комплексного портфеля инвестиционных проектов экономически эффективного развития ЕСГ в целом.

7. Предложен системно-аналитический метод оптимизации основных технико-экономических показателей и мониторинга реализации проектов эффективного развития ЕСГ.

8. Предложена методология разработки архитектуры и режимов функционирования комплекса программ принятия системно-аналитических решений по эффективному развитию ЕСГ. Разработаны программный комплекс анализа и долгосрочной стратегии эффективного развития ТЭК; специализированный пакет программ анализа и эффективности развития ЕСГ; специализированные пакеты программ анализа функционирования и развития основных объектов ЕСГ; программа имитационного ИНС-моделирования объектов газотранспортной системы; программа нейросетевого моделирования и оптимизации крупномасштабной трубопроводной системы; комплекс программ мониторинга состояния территориально-распределенных объектов сложной углеводородной гидравлической цепи.

9. Основные результаты научных исследований практически использованы при разработке ряда нормативных документов по обоснованию требуемых показателей эффективности и методики планирования выполнения основных заданий ряда важнейших документов: Генеральная схема развития газовой отрасли до 2035 года, Программы создания в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке единой системы добычи, транспортировки газа и газоснабжения с учетом возможного экспорта газа на рынки Китая и других стран Азиатско-Тихоокеанского региона; Модели и автоматизированная система для решения технико-экономических задач диспетчерского управления и формирования тарифов на услуги по транспортировке газа; Предложения по раздельной транспортировке газа в зависимости от степени содержания C_{2+} и возможной его переработки в точках, приближенных к целевым потребителям (2017 год); Программа по выводу из эксплуатации избыточных газотранспортных мощностей (2019 год); разработка и внедрение инновационного программно-аналитического инструментария

для оценки, формирования и эффективного управления проектами и портфелями проектов геологоразведочных работ на лицензионных участках Группы Газпром (2020 год); формирование пикового баланса газа по ЕСГ России на десятилетний период с учетом возможности использования запасов газа в трубопроводных системах (2024 год).

10. Практическая реализация результатов основных научных исследований соискателя обеспечила экономический эффект 1 437 млн рублей (см. приложение В.5 диссертации). Изложенные основные научно-практические результаты научно-квалификационной работы обосновывают успешное решение актуальной научной проблемы разработки методологии и интеллектуально-вычислительных инструментов принятия системно-аналитических решений по энергоресурсоэффективному развитию ЕСГ, что имеет важное значение для повышения эффективности и конкурентоспособности экономики РФ при реализации технологического суверенитета и обеспечения технологического лидерства.

Основные направления дальнейших научных исследований соискателя

Развитие научных исследований соискателя будет направлено на успешное решение следующих основных научных задач, которые продолжают основные научные и практические результаты, полученные в настоящей научно-квалификационной работе.

1. Использование методов теории ИИ, включающей теорию глубоких НС, алгоритмы компьютерного зрения, теорию нейросетей, теорию гиперсетей и теорию нечетких множеств, для решения задач предиктивного управления энергоресурсоэффективностью ГТС в условиях неопределенности и больших массивов данных.

2. Применение теории ИНС-моделей и методов системного анализа для разработки новых модифицированных интеллектуально-вычислительных алгоритмов кластерного анализа больших массивов данных, алгоритмов распознавания образов и методов теории графов для решения задач анализа эффективности объектов ЕСГ.

3. Разработка природовдохновленных алгоритмов (метаэвристик) для решения неформализованных задач автоматизированного проектирования энергоресурсоэффективных экологически безопасных систем, оптимизации надежности ГТС, оптимизации стратегии технического обслуживания и ремонтов объектов ГТС.

4. Разработка новых интеллектуально-вычислительных алгоритмов распознавания образов для решения задач планирования эффективного развития ЕСГ, включая выявление новых экономически и экологически эффективных маршрутов транспорта.

5. Модификация интеллектуально-вычислительных методов анализа неравномерности газовых потоков для повышения точности принятия решений по обеспечению безопасности и надежности объектов ЕСГ.

6. Разработка интеллектуальных систем поддержки принятия системно-аналитических решений по управлению эффективностью объектов ТЭК и ЕСГ, разработки экспертных систем логистического управления сложными цепями поставок ЕСГ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному консультанту по диссертационной работе – академику РАН, заслуженному деятелю науки РФ, директору Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики (НОЦ) РХТУ Д.И. Менделеева В.П. Мешалкину за доброжелательность, постоянное внимание, всестороннюю помощь, ценные научно-методические советы и рекомендации.

Автор благодарит своего старшего коллегу – профессора, д-ра техн. наук, А.С. Казака за поддержку, внимание, научно-методические и организационно-технические советы на различных этапах многолетних научных исследований по теме диссертации.

Автор благодарит профессора, д-ра техн. наук, главного научного сотрудника Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Н.Н. Новицкого за внимание и проявленный интерес к научным исследованиям автора, за многогранное подробное коллективное обсуждение основных научно-практических результатов диссертационной работы.

Автор искренно благодарен профессорам кафедры кибернетики химико-технологических процессов РХТУ им. Д.И. Менделеева за глубокие фундаментальные знания, полученные при обучении в РХТУ им. Д.И. Менделеева (в 1988 – 1994 годы), автор благодарен коллективу кафедры логистики и экономической информатики РХТУ им. Д.И. Менделеева за внимание и поддержку при подготовке диссертации к защите.

Автор выражает благодарность сотрудникам ООО «НИИгазэкономика» за многолетнее активное творческое сотрудничество при выполнении некоторых совместных научно-исследовательских разработок по теме диссертации, при написании ряда совместных научных статей, за организационную поддержку, методические советы и рекомендации при публичных обсуждениях разделов диссертационной работы на заседаниях Ученого Совета института.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных

1. Мешалкин В.П., Скобелев Д.О., Попов А.Ю., Гусева Т.В., Малкова А.В., Кисленко Н.А. Приоритетные направления формирования технологического суверенитета в нефтеперерабатывающей отрасли // Теоретические основы химической технологии. – 2026. – Т. 60, № 2. – С. 5–15.

2. Кисленко Н.А., Казак А.С., Олейников А.В., Белинский А.В., Малетин А.В. Анализ и выбор математических уравнений нестационарного течения газа для машинного обучения прокси-моделей магистральных газопроводов // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2025. – № 6. – С. 32–42.

3. Кисленко Н.А., Панкратов С.Н., Дедкова В.В., Белинский А.В., Горлов Д.В., Казак А.С. Практическая реализация применения нейросетевых моделей для моделирования сложных газотранспортных систем большой размерности // Автоматизация и информатизация ТЭК. Математическое моделирование и программное обеспечение. – 2024. – № 9. – С. 33–41.

4. Кисленко Н.А., Панкратов С.Н., Дедкова В.В., Круглова Н.А., Белинский А.В., Горлов Д.В., Пятышев И.А., Казак А.С. Построение модели верхнего уровня агрегации для имитационных расчетов нестационарных режимов работы газотранспортной системы Единой системы газоснабжения // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2024. – № 11. – С. 53–61.

5. Кисленко Н.А. Методический подход к оценке стоимости поставок газа по новым маршрутам // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2023. – № 10. –С. 17–24.

6. Кисленко Н.А. Управление отбором газа при остановке подводного газопровода высокого давления / Н.А. Кисленко, В.С. Кулик // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2022. – № 2. – С. 17–21.

7. Кисленко Н.А., Белинский А.В., Казак А.С., Белинская О.И. Об обоснованности применения, современном состоянии и некоторых перспективах развития нейросетевых моделей Единой системы газоснабжения России // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2022. – № 5 (586).

8. Кисленко Н.А., Белинский А.В., Казак А.С., Белинская О.И. Краткосрочное стохастическое прогнозирование динамики потоков и запасов газа в Единой системе газоснабжения России на основе рекуррентных нейронных сетей // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2021. – № 9 (578), сентябрь. – С. 27–36.

9. Кисленко Н.А., Казак А.С., Горлов Д.В., Постникова И.В. Задача идентификации состава газа в ГТС ЕСГ // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2020. – № 3 (560), март. – С. 29–35.

10. Кисленко Н.А., Казак А.С., Горлов Д.В., Постникова И.В. Задача моделирования и оптимизации поставок газа по ЕСГ с учетом показателей качества газа // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2020. – № 3 (560), март. – С. 36–41.

11. Кисленко Н.А., Казак А.С., Косова К.О. Анализ ретроспективных данных по динамике запаса газа в зависимости от балансовых показателей режимов эксплуатации ГТС // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2020. – № 3 (560), март. – С. 6–14.

12. Кисленко Н.А., Казак А.С., Косова К.О. Идентификация факторов, определяющих запас газа в ГТС, на основе анализа физических законов течения газа // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2020. – № 3 (560), март. – С. 15–21.

13. Кисленко Н.А., Казак А.С., Косова К.О. Регрессионный подход к прогнозу запаса газа в ГТС // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2020. – № 3 (560), март. – С. 22–28.

14. Кисленко Н.А., Соколова Н.А., Ляшенко В.А., Кулик В.С. Подходы к портфельной оптимизации стратегии освоения месторождений разных регионов газодобычи // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2020. – № 3 (560), март. – С. 42–49.

15. Литвин Ю.В., Кисленко Н.А., Кулик В.С., Шрейдер А.А., Мозговой В.С., Хабибуллин Д.Я. Автоматизация построения плана проведения геологоразведочных работ с использованием методов математического программирования // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2020. – № 3 (560), март. – С. 50–55.

16. Кисленко Н.А., Литвин Ю.В., Магдеев Р.А. Использование ключевых показателей эффективности в автоматизации процессов управления научными организациями нефтегазовой отрасли // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2009. – № 5. – С. 8–15.

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Казак К.А., Гитман И.С., Казак А.С., Кисленко Н.А. Формирование приоритетов реализации проектов поставок газа потребителям на основании методов нечеткой логики // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 2-2 (32). – С. 256–262.

2. Кисленко Н.А., Казак К.А., Казак А.С., Кнотько В.В. Нейросетевое прогнозирование параметров ГТС // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 1 (31). – С. 56–60.

3. Казак К.А., Кнотько В.В., Кисленко Н.А., Казак А.С. Применение авторегрессионной модели для улучшения качества прогноза // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 4-2 (30). – С. 247–249.

4. Казак К.А., Кнотько В.В., Кисленко Н.А., Казак А.С. Вероятностная методика оценки работоспособности датчиков // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 4-2 (30). – С. 249–251.

5. Казак К.А., Кнотько В.В., Кисленко Н.А., Казак А.С. Корректировка диспетчерских данных методом частичного сглаживания // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 4-1 (30). – С. 152–155.

6. Казак К.А., Кнотько В.В., Кисленко Н.А., Казак А.С. Регрессионный анализ технологических характеристик ГТС // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 4-1 (30). – С. 155–159.

Публикации в прочих изданиях

1. Аксютин О.Е., Недзвецкий М.Ю., Середенок В.А., Кисленко Н.А. Результаты реализации проекта «Цифрового двойник» геолого-технологической модели:

продуктивные пласты – скважины – газосборная сеть – пункт переключающей арматуры Южно-Русского месторождения // Газовая промышленность. – 2026. – № 4. – С. 76–83.

2. Панкратов С.Н., Кисленко Н.А., Дедкова В.В., Белинский А.В., Круглова Н.А. Модели имитации и планирования нестационарных режимов работы газотранспортных систем на верхнем уровне диспетчерского управления системами газоснабжения с применением методов машинного обучения // Газовая промышленность. – 2026. – № S1. – С. 72–80.

3. Кисленко Н.А., Барабанова Ю.А., Белинский А.В., Васильев Г.И., Седов А.М., Филипьев Н.А. Искусственный интеллект в управлении инвестиционной деятельностью: текущее состояние и перспективы развития // Газовая промышленность. – 2025. – № 8 (885). – С. 110–123.

4. Кисленко Н.А., Лебедев Ю.В., Карпенко С.П., Литвин Ю.В., Обухов О.Е., Кулик В.С. Имитационно-аналитический комплекс моделирования предприятий нефтегазопереработки как инструмент повышения точности планирования и поддержки принятия управленческих решений // Газовая промышленность. – 2025. – № S3 (886). – С. 140–152.

5. Кисленко Н.А., Мешалкин В.П. Метод компьютерного структурно-функционального анализа газовой промышленности, как сложной подсистемы топливно-энергетического комплекса // Математические методы в технике и технологиях. – 2025. – № 12-2. – С. 39–43.

6. Кисленко Н.А., Белинский А.В., Казак А.С. Методы, алгоритмы и инструменты моделирования и оптимизации режимов работы Единой системы газоснабжения России на основе технологий искусственного интеллекта // Газовая промышленность. – 2021. – № 9 (821). – С. 88–96.

7. Кисленко Н.А., Литвин Ю.В., Соколова Н.А., Кулик В.С., Шрейдер А.А., Щекалев Р.В. Разработка комплекса программ поддержки принятия решения по проведению геологоразведочных работ нефтегазовой компании // Газовая промышленность. – 2021. – № S2. – С. 108–113.

8. Кисленко Н.А., Литвин Ю.В., Ахмедсафин С.К., Щекалев Р.В. Единая система управления проектами и портфелями проектов геологоразведочных работ // Газовая промышленность. – 2020. – № 1 (795). – С. 98–103.

9. Kislenko N., Sukharev M., Kazak A., Fomina E. Study on Multi-Component Flows in Gas Transmission Systems (Flow and Measurement Processing Models) // Energy Systems Research. – 2019. – Vol. 2, No. 3. – P. 29–32.

10. Кисленко Н.А., Копылова Ю.С. Учет климатического фактора при оценке потенциала энергосбережения на уровне отдельных стран и регионов // Вестник университета. – 2019. – № 4. – С. 106–110.\

11. Кисленко Н.А., Копылова Ю.С., Маланичева Н.В. Системный подход к оценке потенциала энергосбережения на уровне отдельных стран и регионов // Вестник Университета. – 2019. – № 8. – С. 90–95.

12. Кисленко Н.А., Копылова Ю.С., Маланичева Н.В. Учет динамики промышленного производства при оценке потенциала энергосбережения на уровне отдельных стран и регионов // Вестник Университета. – 2019. – № 9. – С. 125–130.

13. Кисленко Н.А. Проблемы моделирования управленческих решений развития газовой промышленности // Вестник Университета (Государственный университет управления). – 2012. – № 20. – С. 102–106.

14. Гафаров Н.А., Кисленко Н.А., Гервиц Е.С. Эксерго-экономический подход как универсальный метод анализа эффективности энергетических систем и процессов // Газовая промышленность. – 2012. – № 6. – С. 10–15.

15. Кисленко Н.А. Энергия мысли – эффективность решений // Газовая промышленность. – 2012. – № 8. – С. 10–13.

Публичные доклады на всероссийских и международных научных мероприятиях (конференциях, съездах, симпозиумах, конгрессах)

1. Кисленко Н.А. Применение методов системного анализа для разработки стратегии развития газовой отрасли / Н.А. Кисленко, А.С. Казак // Доклады XXXIII Международной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития науки и технологии». – Тула, 2024. – С. 327–328.

2. Кисленко Н.А. Программный инструментарий планирования развития газовой отрасли / Н.А. Кисленко, А.С. Казак // Доклады III Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Экология и техносферная безопасность». – Тула, 2024. – С. 78–81.

3. Кисленко Н.А. Анализ тенденций развития ТЭК как сложный системы / Н.А. Кисленко, А.С. Казак // Доклады XXVIII Международной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития науки и технологии». – Тула, 2023. – С. 232–233.

4. Кисленко Н.А. Основные принципы синхронизации развития газовой отрасли на этапе синтеза / Н.А. Кисленко, А.С. Казак // Доклады II Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Экология и техносферная безопасность». – Тула, 2023. – С. 198–199.

5. Кисленко Н.А. Идентификация факторов и оценка уровня их влияния на баланс газа / Н.А. Кисленко, А.С. Казак // Доклады XXX Международной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития науки технологии». – Тула, 2022. – С. 230–233.

6. Кисленко Н.А. Моделирование глобальной энергетики для формирования стратегии развития газовой отрасли / Н.А. Кисленко, А.С. Казак // Доклады XXXI Международной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития науки технологии». – Тула, 2022. – С. 299–295.

7. Кисленко Н.А. Анализ тенденций развития глобальной энергетики как сложной системы ТЭК / Н.А. Кисленко, А.С. Казак // Доклады XXIX Международной научно-практической конференции Приоритетные направления развития науки и технологии. – Тула, 2021. – С. 181–182.

8. Кисленко Н.А. Проблемы оценки изменения состава природного газа при его транспортировке по ЕСГ РФ / Н.А. Кисленко, М.Г. Сухарев, А.С. Казак // Доклады VIII Международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2019)». – Тула, 2019. – С. 17.

Свидетельства о результатах интеллектуальной деятельности

1. Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ RU 2026680239. Программный модуль автоматизации операций в среде электронных таблиц системы / Н.А. Кисленко. – № 2026668087; опубл. 10.07.2026.

2. Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ RU 2026680238. Надстройка управления и создания нейросетевых моделей с указанием

параметров функционирования для программного пакета Neural Bench / Н.А. Кисленко. – № 2026668084; опубл. 10.07.2026.

3. Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ RU 2026680237. Универсальный идентификатор Газплан / Н.А. Кисленко. – № 2026668083; опубл. 10.07.2026.

4. Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ RU 2026610617. Программа удаленного контроля параметров сложной углеводородной гидравлической цепи магистральной газотранспортной системы / Н.А. Кисленко, В.П. Мешалкин. – № 2025697836; опубл. 14.01.2026.

5. Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ RU 2025697879. Программа мониторинга территориально-распределенных объектов сложной углеводородной гидравлической цепи / Н.А. Кисленко, В.П. Мешалкин. – № 2025696954; опубл. 26.12.2025.

6. Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ RU 2025697052. Программа дистанционного мониторинга технологических параметров сложной углеводородной гидравлической цепи / Н.А. Кисленко, В.П. Мешалкин. – № 2025696116; опубл. 22.12.2025.

7. Патент на изобретение RU 2820047 C1. Способ оптимального управления крупномасштабными трубопроводными системами энергетики с применением технологии искусственного интеллекта / Н.А. Кисленко, А.С. Казак, А.В. Белинский [и др.]. – № 2023134093; заявл. от 20.12.2023; опубл. 28.05.2024.

8. Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ RU 2022668875. Нейросетевые имитационные модели объектов газотранспортной системы Единой системы газоснабжения России / Н.А. Кисленко, А.В. Белинский, А.С. Казак. – № 2022668265; опубл. 12.10.2022.

9. Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ RU 2022668876. Нейросетевая оптимизационная модель крупномасштабной трубопроводной системы энергетики / Н.А. Кисленко, А.В. Белинский, А.С. Казак. – № 2022668269; опубл. 12.10.2022.

10. Патент на изобретение RU 2733969 C1. Способ уточненной оценки показателей качества природного газа при его транспортировке по газотранспортной

системе / Н.А. Кисленко, М.Г. Сухарев, А.С. Казак, Е.В. Фомина. – № 2020106144; заявл. от 10.02.2020; опубл. 08.10.2020.

Монографии

1. Кисленко Н.А., Казак А.С., Чионов А.М. [и др.]. От простого к сложному: Иерархический поход к расчетам магистральных газопроводов как сложных систем / под общ. ред. А.С. Казака. – М.: НИИгазэкономика, 2021. – 320 с.

2. Кириченко О.С., Кисленко Н.А., Комзолов А.А. [и др.]. Комплексная методология анализа эффективности и рисков инвестиционных проектов в газовой промышленности: монография. – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2009. – 168 с.

3. Samsonov R., Kazak A., Bashkin V., Kislenko N. Master plan methodology for gas industry development Moscow, Scientific World // Research & Development Institute of Natural Gases and Technologies – VNIIGAZ/ GAZPROM. – 2007. – 302 p.

4. Кисленко Н.А., Сторонский Н.М., Постников В.Д. Трубопроводные системы энергетики: модели приложения, информационные технологии. – М.: Нефть и газ, 2000. – 320 с.