

На правах рукописи

ЛАНИН СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**Статистическое обеспечение моделирования режимов
магистрального транспорта природного газа**

Специальность 5.2.2 – Математические, статистические и
инструментальные методы в экономике

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
экономических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный экономический университет»

Научный руководитель доктор экономических наук, доцент
Кудрявцев Андрей Алексеевич

Официальные оппоненты: **Ильясов Руслан Хизраилевич**
доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры «Учет, анализ и аудит в цифровой экономике» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова»

Шиболденков Владимир Александрович
кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры бизнес-информатики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (НИУ)»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Национальный исследовательский университет «МЭИ»**»

Защита диссертации состоится «27» апреля 2026 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.386.09 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный экономический университет» по адресу: 191023, Санкт-Петербург, наб. канала Грибоедова, д. 30/32, ауд. 3033.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://unecon.ru/nauka/dis-sovety/dissertaczii-predstavlennye-v-spbgeu/> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный экономический университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

М.П. Декина

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. В условиях усложнения технологических процессов и растущих требований к точности данных традиционные методы становятся недостаточными.

Единая система газоснабжения (ЕСГ) России – крупнейшая в мире централизованная сеть добычи, транспортировки, хранения и распределения газа. Она включает более 170 тыс. км магистральных газопроводов, около 250 компрессорных станций с общей мощностью свыше 46 тыс. МВт и подземные хранилища газа. Эффективность её функционирования зависит от технического состояния оборудования, баланса спроса и предложения и внешнеэкономических факторов.

Интеграция технологий машинного обучения, анализа данных и эволюционных алгоритмов в процессы планирования и прогнозирования расхода топливного газа (ТГ) позволяет повысить точность управленческих решений и сократить эксплуатационные издержки.

Актуальность исследования также обусловлена необходимостью объединения технических и экономических факторов в рамках единой оптимизационной модели. Многокритериальные подходы позволяют учитывать как технологические, так и стоимостные параметры, способствуя минимизации затрат и росту эффективности ГТС.

Диссертация направлена на решение научной и прикладной задачи: разработку моделей и инструментов для точного прогнозирования, оптимизации режимов работы и построения системы поддержки принятия решений (СППР), ориентированной на экономически обоснованное управление потоками природного газа.

Степень разработанности научной проблемы. Вопросы моделирования и оптимизации режимов функционирования ГТС широко представлены в отечественной и зарубежной литературе. Зарубежные исследователи активно используют методы машинного обучения, нейросети и современные оптимизационные алгоритмы при прогнозировании потребления газа и транспортных потоков (Goncu A., Taskinen A., Brabec M., Gill S., Deferrari J., Kashani A.H., Bonnans J., De Wolf D. и др.). Однако в их работах, как правило, недостаточно внимания уделяется экономической эффективности решений, их применимости к реальным условиям функционирующих ГТС и отраслевому регулированию, что и составляет предмет настоящего исследования.

В отечественных исследованиях основное внимание сосредоточено на построении математических моделей компрессорных станций (КС) (Кулик В.С., Курбатова Г.И.), симуляции потоков (Белинский А.В., Марченко С.Г.), прогнозировании потребления газа (Дубинский А.В., Панкратов С.Н., Лобанов А.Н.), управлении запасами (Кисленко Н.А.,

Косова К.О.) и расходом на компримирование (Кудрявцев А.А., Ряжских В.И.). Используемые подходы преимущественно основаны на детерминированных моделях, слабо адаптированных к условиям неопределённости и экономической волатильности. Применение методов машинного обучения и эволюционных алгоритмов в задачах оптимизации транспортных процессов остаётся слабо разработанным направлением в отечественной науке.

Актуальной остаётся задача интеграции технических и экономических факторов в единый процесс принятия решений. Большинство существующих моделей решают либо чисто технологические, либо экономические задачи, в то время как многокритериальные подходы находятся в стадии становления.

Настоящая работа направлена на восполнение этих пробелов и разработку инструментов, обеспечивающих экономически эффективное управление потоками природного газа в условиях неопределённости и динамики внешней среды.

Целью диссертационного исследования является разработка и обоснование методов и инструментов для повышения точности, достоверности и экономической эффективности управления ГТС путем интеграции современных технологий машинного обучения, анализа данных и эволюционных алгоритмов.

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

– разработать методы управления качеством данных, направленные на идентификацию ошибок, выявление аномалий и анализ достоверности получаемой информации, позволяющие учитывать отраслевую специфику и отвечающие более широкому кругу практических ситуаций по сравнению с существующими подходами;

– разработать методы корректировки ошибок и восстановления пропущенных данных на основе горизонтального и вертикального анализа взаимосвязанных режимно-технологических и учетно-балансовых показателей;

– построить модели прогнозирования расхода топливного газа по балансовым зонам и в целом по газотранспортной системе на основе ретроспективных данных, позволяющие существенно повышать качество прогнозов по сравнению с традиционными методами;

– разработать интегрированный подход к многокритериальной оптимизации режимов транспортировки газа, учитывающий технические и экономические показатели функционирования системы и принципиально отличающийся от традиционных однокритериальных подходов;

– разработать прототип системы поддержки принятия решений в области управления потоками природного газа масштаба ЕСГ, интегрирующий модели управления данными и прогнозирования, и алгоритмы многокритериальной оптимизации;

– предложить современный подход к оценке экономической эффективности разработанного инструментария на основе сравнительного анализа затрат и выгод, позволяющий, в отличие от традиционного директивного подхода, учитывать фактическую ставку дисконтирования, отражающую реальную структуру капитала и условия функционирования газотранспортной отрасли.

Объектом исследования являются экономико-организационные процессы управления ЕСГ Российской Федерации как отраслевым элементом топливно-энергетического сектора, включающим магистральные газопроводы, КС, системы хранения природного газа и деятельность ГТО.

Предметом исследования являются методы и инструменты повышения экономической эффективности управления газотранспортным комплексом, включая информационно-аналитические технологии СППР, методы статистического анализа, повышения точности прогнозирования и оптимизации режимов работы с использованием инструментов машинного обучения, анализа данных и эволюционных алгоритмов.

Теоретическую основу исследования составляют результаты исследований современных отечественных и зарубежных ученых в области экономико-математического моделирования, теории управления, машинного обучения и эволюционных алгоритмов, а также многокритериальной оптимизации, обработки данных и анализа неопределённости в ГТС.

Методология исследования, проведенного в диссертационной работе, помимо общенаучных подходов (анализ, синтез, индукция, дедукция, логическое моделирование и системный подход), основана на использовании следующих специальных научных направлений:

- методов экономико-математического моделирования;
- методов машинного обучения;
- подходов к многокритериальной оптимизации, в первую очередь эволюционным алгоритмам;
- методов модульного и объектно-ориентированного программирования;
- методов статистического анализа и обработки данных;
- элементов теории графов и теории нечётких множеств;
- методов принятия решений в условиях неопределённости.

Информационной базой исследования являются технологические и учетные ретроспективные режимно-технологические и учетно-балансовые данные газотранспортных компаний, результаты научных публикаций, аналитические отчеты отраслевых организаций, а также данные, полученные в результате компьютерного моделирования.

Обоснованность результатов исследования обеспечивается проработанностью темы диссертационного исследования с использованием статистических методов анализа, современных методов математического моделирования, сравнительным анализом предложенных подходов с существующими методами управления ГТС, а также верификацией полученных данных на реальных и смоделированных сценариях эксплуатации.

Достоверность результатов подтверждается применением статистических и математических методов к ретроспективным режимно-технологическим и учетно-балансовым данным, апробацией полученных результатов исследования на международных и российских научно-практических конференциях, публикацией итоговых результатов проведенных исследований в открытом доступе.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке методов управления качеством данных для идентификации и корректировки ошибок и аномалий с введением интегрального показателя статистико-экономического эффекта AIVI. Построены модели прогнозирования расхода топливного газа, обеспечивающие повышение точности расчётов по сравнению с традиционными методами. Предложен многокритериальный подход к оптимизации режимов транспортировки газа, отличающийся возможностью совмещения технических и экономических критериев. Впервые создан прототип СППР масштаба ЕСГ, интегрирующий прогнозные модели и алгоритмы оптимизации. Разработан метод оценки экономической эффективности с использованием WACC, позволяющий учитывать фактическую структуру капитала вместо директивной ставки.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике: п. 3. – «Разработка и развитие математических и эконометрических моделей анализа экономических процессов (в т.ч. в исторической перспективе) и их прогнозирования»; п. 4. – «Разработка и развитие математических и компьютерных моделей и инструментов анализа и оптимизации процессов принятия решений в экономических системах»; п. 17. – «Развитие и применение инструментария разработки

систем поддержки принятия решений в сфере экономической политики и обеспечения национальных интересов».

Наиболее существенные результаты исследования, обладающие научной новизной и полученные лично соискателем:

– разработаны методы управления качеством данных и их достоверностью, обеспечивающие минимизацию ошибок и аномалий в технологических данных;

– созданы алгоритмы идентификации и корректировки ошибок в режиме реального времени на основе методов машинного обучения, предложен интегральный показатель статистико-экономического эффекта работы модуля детекции аномалий (AIVI);

– разработаны подходы к прогнозированию расхода топливного газа на КС с учетом динамических изменений эксплуатационных условий, предложен механизм экономической оценки внедрения прогнозных моделей;

– предложены методы многокритериальной оптимизации режимов работы ГТС с учетом экономических и технических факторов;

– разработан прототип интегрированной СППР для диспетчерского управления потоками природного газа, позволяющая повысить эффективность работы газотранспортных предприятий;

– проведена оценка экономической эффективности разработанных методов и алгоритмов на основе сравнительного анализа с традиционными подходами.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии научных основ управления потоками природного газа на основе методов машинного обучения и эволюционных алгоритмов. В работе формализованы математические модели прогнозирования и оптимизации транспортировки газа, предложены новые подходы к многокритериальному анализу решений, а также обоснованы методы обработки и корректировки данных в условиях неопределенности.

Практическая значимость исследования заключается в разработке и внедрении методов и алгоритмов, способствующих повышению экономической эффективности управления ГТС. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации режимов работы транспортировки природного газа, прогнозирования расхода топливного газа и снижения эксплуатационных затрат путем интеграции разработанных инструментов и методик в автоматизированные системы диспетчерского управления газотранспортных предприятий.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты диссертационного исследования прошли апробацию на 11 международных и всероссийских научных и научно-практических

конференциях и отраслевых семинарах. Наиболее значимыми из них являются:

– семинар компании Wintershall Dea GmbH «Цифровизация бизнес-процессов»;

– отраслевой семинар ООО «НИИгазэкономика» по вопросам применения цифровых технологий и искусственного интеллекта в задачах диспетчерского управления системами газоснабжения;

– международная научная конференция «Государство и рынок: евразийская доминанта развития в условиях формирования многополярного мира» (ФГБОУ ВО «СПбГЭУ»).

Результаты исследования обсуждались в профессиональном научном и отраслевом сообществе и получили положительную оценку, что подтверждает их научную обоснованность и практическую значимость.

Публикации результатов исследования. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 14 научных работах общим объёмом 9,58 п.л. (личный вклад – 8,81 п.л.), в том числе в 6 публикациях общим объемом 6,31 п.л. (личный вклад – 5,94 п.л.) в ведущих российских рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации для публикаций по научной специальности 5.2.2 – Математические, статистические и инструментальные методы в экономике.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Текст изложен на 178 страницах машинописного текста, включает 33 рисунка, 34 таблицы. Список литературы содержит 176 наименований, в том числе нормативные правовые акты и материалы глобальной сети Интернет.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработаны методы управления качеством данных, направленные на идентификацию ошибок, выявление аномалий и анализ достоверности получаемой информации, позволяющие учитывать отраслевую специфику и отвечающие более широкому кругу практических ситуаций по сравнению с существующими подходами.

Актуальность данной задачи обусловлена тем, что в условиях масштабной и распределённой инфраструктуры ЕСГ сбор и интерпретация данных сопряжены с высокой вероятностью ошибок, обусловленных как техническими сбоями, так и человеческим фактором.

Для обеспечения высокого уровня достоверности информации разработан подход к фильтрации данных на основе предварительного анализа допустимых значений, который учитывает физико-химические ограничения и специфику измеряемых параметров.

Основные классы показателей и их допустимые диапазоны представлены в таблице 1, где систематизированы границы корректных значений, позволяющие отсекаать очевидные ошибки измерений.

Одним из разработанных автором методов идентификации аномалий в статических структурах газотранспортной системы является адаптация первого правила Кирхгофа. На основе балансового принципа разработана формализованная система контроля целостности данных газовых потоков в пределах балансовой зоны, представленная формулами 1–4. Отклонение от расчетного равенства служит индикатором наличия скомпрометированных или недостоверных данных, что позволяет оперативно выявлять нарушения в информационной модели объекта.

Таблица 1. Определение допустимых значений показателей

Номер ID	Единица измерения показателя		Количество классов показателя	Допустимые значения
1267986	Штука	шт.	78	$n = \{x \in \mathbb{Z}: x \geq 0\}$
1268040	Тысяча тонн	тыс. т	111	
1267994	Тысяча метров кубических в час	тыс. м ³ /час	72	
1267995	Тысяча метров кубических	тыс. м ³	200	
1268026	Тонна	тонн	255	
9954674	Тонна в час	т/час	42	
1268001	Килограмм-силы на квадратный сантиметр	кгс/см ²	100	
1267982	Не определена	Б/н	70	$n = \{x \in \mathbb{R}: -271 \leq x\}$
1267997	Градус Цельсия	°С	263	
1268036	Молярный процент	% мол.	66	$n = \{x \in \mathbb{R}: 0 \geq x \geq 1\}$

$$\sum \text{Пост} = \sum \text{Доб} + \sum \text{Перераб.}_+ + \sum \text{ГТО}_{\text{выше}} + \sum \text{ПХГ}_- \quad (1)$$

$$\sum \text{ГТО} = \sum \text{СТН} + \sum \Delta \text{Запас}_+ + \sum \text{Порт} - \sum \Delta \text{Запас}_- \quad (2)$$

$$\sum \text{Расп} = \sum \text{Перераб.}_- + \sum \text{ГТО}_{\text{ниже}} + \sum \text{ПХГ}_+ + \sum \text{Экспорт} \quad (3)$$

Таким образом:

$$\Sigma \text{Пост} = \Sigma \text{ГТО} + \Sigma \text{Расп} \quad (4)$$

Особое внимание в работе уделено задаче детекции аномалий в технологических данных, характеризующих газотранспортные потоки в динамике. Для относительно простых линейных участков, не включающих узлы смешения потоков, временное смещение сигналов предлагается выявлять с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Определение максимального значения коэффициента позволяет оценить лаг между временными рядами, что, в свою очередь, обеспечивает возможность корректного сопоставления показателей, таких как физико-химические характеристики газа, путём синхронизации по скорректированной временной шкале.

Для более сложных фрагментов газотранспортной системы, содержащих узлы смешения потоков и точки отбора природного газа, впервые предложено использование методов машинного обучения, в частности нейронных сетей (рис. 1).

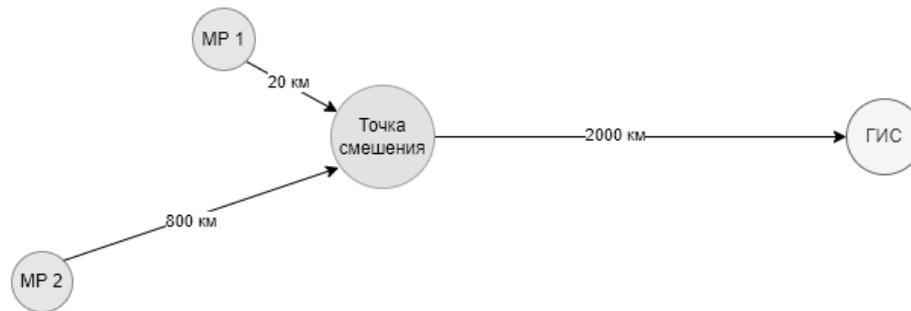


Рисунок 1. Расположение узловых точек транспортировки газа

Предложенный автором подход позволяет учитывать динамические взаимосвязи между показателями потоков и обеспечивает более точную реконструкцию и анализ данных в условиях высокой структурной сложности системы. Архитектура разработанной автором нейронной модели приведена в таблице 2.

Предложенные методы комплексного анализа данных позволяют значительно повысить надёжность информационного обеспечения процессов управления ГТС и служат основой для интеллектуальных систем поддержки принятия решений в условиях высокой технологической и экономической неопределённости.

Таблица 2. Архитектура нейронной сети

Слой	Размерность	Количество параметров
LSTM(34, return_sequences=True)	(None, 30, 34)	5 032
Dropout(0.2)	(None, 30, 34)	0
LSTM(16, return_sequences=False)	(None, 16)	3 264
BatchNormalization	(None, 16)	64
Dense(20, activation="relu")	(None, 20)	340
Dropout(0.2)	(None, 20)	0
Dense(1, activation="linear")	(None, 1)	21

2. Разработаны методы корректировки ошибок и восстановления пропущенных данных, основанные на горизонтальном и вертикальном анализе; впервые разработан интегральный показатель статистико-экономического эффекта – Anomaly Impact Value Index, отражающий совокупный стоимостной результат функционирования модуля детекции и корректировки аномалий и ошибок.

Особенностью предложенного подхода является реализация многоуровневой процедуры проверки достоверности информации, поступающей в систему управления ЕСГ, с интеграцией как классических статистических процедур, так и нейросетевых моделей.

Ключевым элементом решения является модуль детекции и корректировки аномалий, предложенный автором к реализации в составе модуля системы диспетчерского управления ЕСГ. Архитектура модуля представлена на рисунке 3 и включает каскадную систему проверки: от базового контроля границ показателей до интеллектуального анализа с применением нейросети.

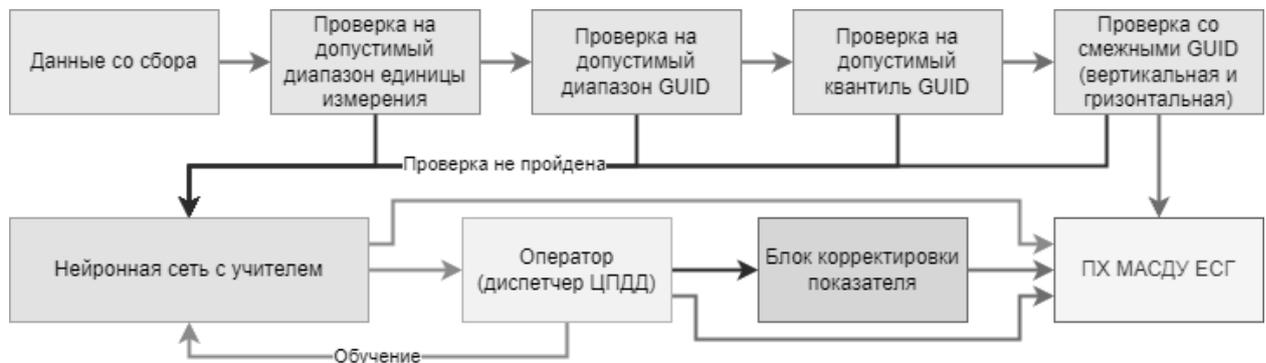


Рисунок 2. Концептуальная схема модуля детекции и коррекции аномалий

Для обработки и коррекции данных использовались методы горизонтального и вертикального анализа. Первый выявляет взаимосвязи между технологическими параметрами в одном временном срезе

(например, компонентами состава газа), второй – пространственные зависимости между точками сети, позволяющие интерполировать данные вдоль маршрутов транспортировки.

Ключевым элементом системы является классификационная нейросеть, обученная на диспетчерских решениях. Это обеспечивает адаптацию к изменяющимся условиям и сокращение числа ложных срабатываний.

Предложенный подход обеспечивает автоматическое выявление и корректировку отклонений, связанных как с техническими сбоями, так и с особенностями физико-химических процессов в ГТС.

Для оценки эффективности реализован интегральный показатель – Anomaly Impact Value Index (AIVI), отражающий стоимостной эффект работы системы: предотвращённые потери и полученную выгоду с учётом стоимости ошибок.

Математически AIVI определяется следующим образом (формула 5):

$$AIVI = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^{TP} - \sum_{j=1}^m \varepsilon_j^{FP} \right) \quad (5)$$

где n – количество корректно выявленных аномалий (True Positives); m – количество ложных срабатываний (False Positives); ε_i^{TP} – стоимостной эффект от i -й верной детекции; ε_j^{FP} – стоимостной эффект от j -й ложной тревоги (может быть как отрицательным, так и положительным).

3. Построены модели прогнозирования расхода топливного газа по балансовым зонам и в целом по ГТС, позволяющие существенно повышать качество прогнозов по сравнению с традиционными методами.

В основу положены методы машинного обучения, кластерного анализа и нейросетевого моделирования, позволяющие учитывать пространственно-временные особенности функционирования ЕСГ.

Для повышения точности прогнозов реализован подход предварительной кластеризации временных рядов, при котором для каждой балансовой зоны обоснованно определено оптимальное число кластеров с применением статистических методов: метод «локтя»; метод силуэта; индекс Дэвиса-Боулдина; индекс Калински-Харабаса.

На следующем этапе на основе полученных кластеров были разработаны нейросетевые модели – как на базе полносвязной архитектуры, так и с использованием сверточного слоя (Conv1D), позволяющего выявлять закономерности во временных рядах.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования расхода топливного газа на компримирование по балансовой зоне №16. Высокое значение $R^2 = 0,956$ и низкий $MAPE = 2,64\%$ подтверждают достоверность работы модели, в основе которой лежит нейронная сеть со сверточными слоями.

В диссертационном исследовании впервые разработан подход к экономической оценке эффективности прогнозных моделей расхода топливного газа, основанный на выявлении неэффективных режимов работы КС. В качестве исходной гипотезы принято, что в отдельные газовые сутки агрегаты КС балансовой зоны функционировали в условиях перерасхода топлива. Идентификация таких периодов осуществлялась по превышению порогового значения удельного расхода газа на прокачку. Для количественной оценки перерасхода автором разработана интервальная модель, основанная на адаптивных квантилях: значения удельного расхода, попадающие в заданный диапазон, интерпретируются как отражающие оптимальные режимы эксплуатации, в то время как отклонения за пределы интервала указывают на избыточное потребление топливного газа.

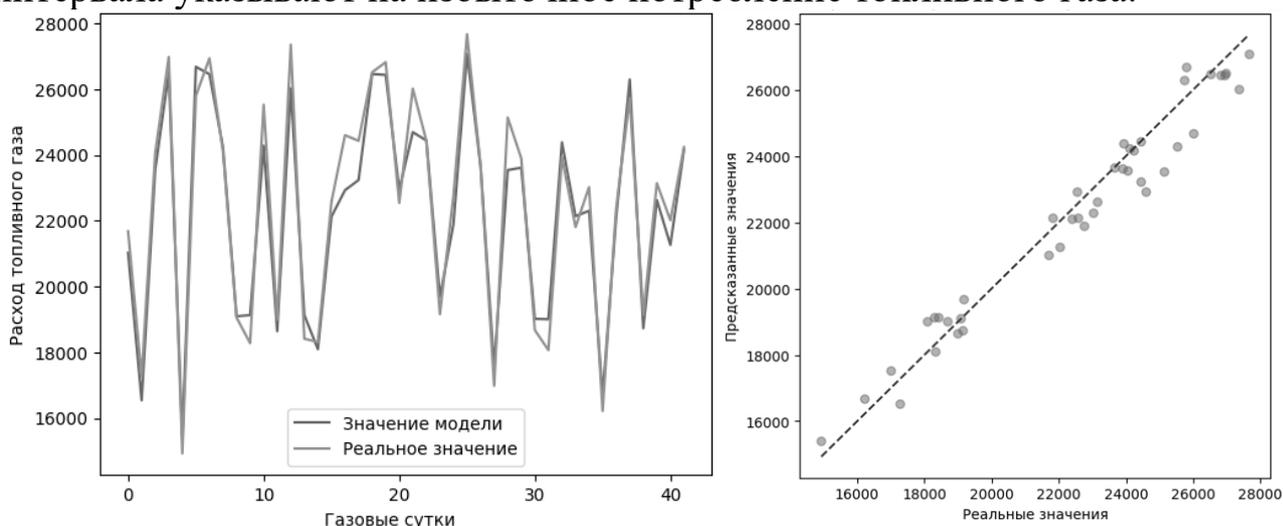


Рисунок 3. Оценка качества работы прогнозной модели

Проведённый экономический анализ показал, что точное прогнозирование позволяет избежать перерасхода по одной балансовой зоне до 128,9 млн куб. м топливного газа в год.

Прогнозная экономия в течение пяти лет при использовании разработанных моделей может составить 1 490 млн руб. с учетом дисконтирования денежных потоков (табл. 3) в целом по ЕСГ.

Таблица 3. Расчет экономического эффекта

Год	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Денежный поток от экономии ТГ в базовом году, тыс. руб.	285 007					
Рост цены на газ, %		10,30	4,30	4,00	4,00	4,00
Добыча газа, млрд. куб. м, базовый год	668,2	695,4	709,1	729,7		
Рост добычи газа, %		4,07	1,97	2,91	2,98	2,98
Денежный поток от экономии ТГ, тыс. руб.		327 168	347 956	372 395	398 844	427 173
Фактор дисконтирования		1,000	0,893	0,797	0,712	0,636
Приведенный денежный поток, млн руб.		327 168	310 675	296 871	283 890	271 476
ИТОГО, тыс. руб.		1 490 079				

Внедрение предложенных прогнозных моделей обеспечивает не только технологическую, но и экономическую эффективность управления режимами работы КС, способствуя повышению устойчивости функционирования ГТС и достижению оптимальных режимов её работы.

4. Разработан интегрированный подход к многокритериальной оптимизации режимов транспортировки газа, принципиально отличающийся от традиционных однокритериальных методов.

В основу разработанного подхода положено представление ЕСГ с формализацией потоков газа через ориентированный граф, узлы которого соответствуют балансовым зонам, а рёбра – газотранспортным маршрутам.

Оптимизация потоков газа осуществляется с использованием модифицированного эволюционного алгоритма, где каждый кандидат представляет собой распределение долей потоков газа на входах в балансовые зоны. Генерация этих распределений осуществляется на основе многомерного распределения Дирихле, обеспечивающего нормированность векторов долей и соответствие физическим ограничениям. Алгоритм включает адаптивный механизм отбора, скрещивания и мутации кандидатов с учётом значений целевой функции, представленной в виде суммарных стоимостных затрат на топливный газ.

Новизной предлагаемого подхода является возможность включения множества дополнительных критериев оптимизации: ограничений по пропускной способности, приоритетного использования отдельных маршрутов, закачки или отбора газа из ПХГ, равномерной загрузки КС и др. Эти параметры могут быть интегрированы в целевую функцию в виде

штрафов или поощрений, что обеспечивает многокритериальный характер оптимизации без необходимости перестройки алгоритма.

Корректность моделей подтверждена сравнением расчётных и фактических затрат на топливный газ по балансовым зонам (таблица 4), где отклонение не превышает 3,07% и укладывается в допустимые пределы, установленные нормативами ПАО «Газпром».

Применение оптимизационного алгоритма позволило спрогнозировать снижение суммарных затрат на топливный газ с 305,3 до 291,6 млн руб. за 1 газовые сутки, что эквивалентно снижению на 4,48%. Итоговое перераспределение потоков между балансовыми зонами визуализировано на рисунке 4 и позволяет наглядно оценить эффективность работы алгоритма.

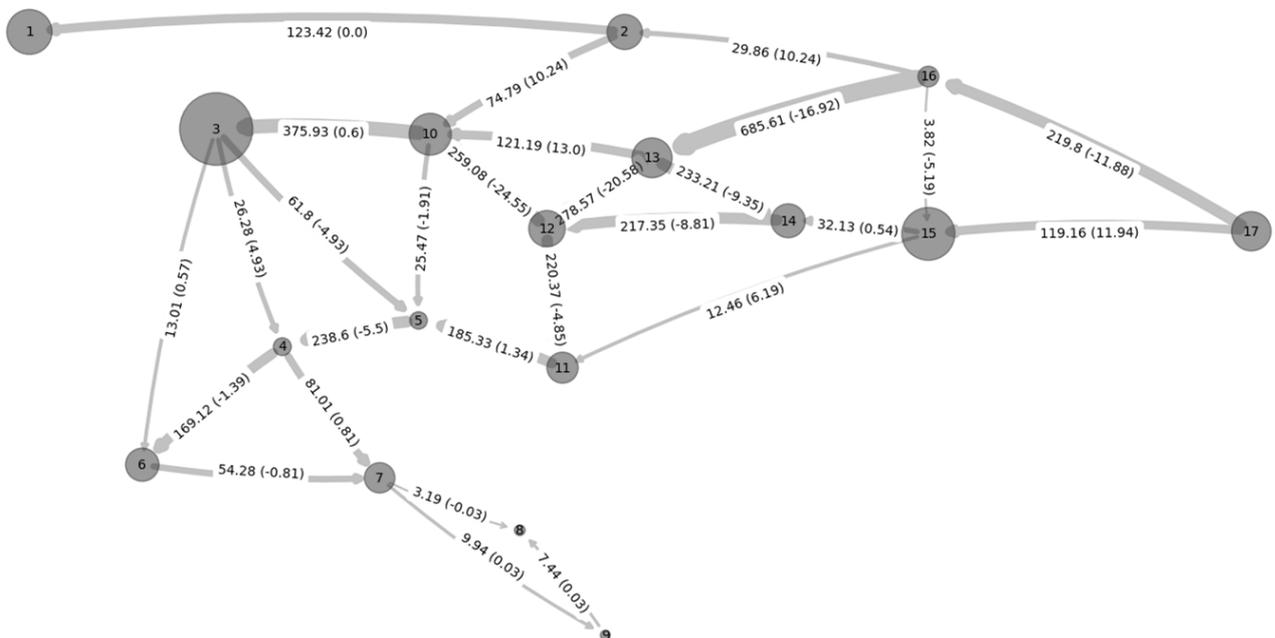


Рисунок 4. Итоговый граф распределения потоков газа после оптимизации

Разработанный подход обеспечивает достижение экономического эффекта без нарушения технической устойчивости системы и может быть использован как инструмент поддержки принятия решений в рамках оперативного и стратегического планирования транспортировки газа.

Таблица 4. Результаты работы эволюционного оптимизационного алгоритма

Номер бал. зоны	Расчетное значение СТН, тыс. руб.	Фактическое значение СТН, тыс. руб.	Отклонение, тыс. руб.	Отклонение, %	Оптимизированное значение, тыс. руб.	Отклонение, тыс. руб.	Отклонение, %
1	6 344,09	7 768,04	1 423,95	18,33	5 399,27	944,82	14,89
2	18 793,20	17 608,08	-1 185,12	-6,73	18 633,82	159,38	0,85
3	6 359,67	5 655,95	-703,73	-12,44	6 178,71	180,96	2,85
4	27 379,76	28 051,82	672,05	2,4	27 477,72	-97,95	-0,36
5	13 186,82	13 699,04	512,22	3,74	12 351,57	835,25	6,33
6	18 096,83	18 024,96	-71,87	-0,4	17 679,00	417,83	2,31
7	3 054,39	2 551,42	-502,97	-19,71	3 027,42	26,96	0,88
8	29,60	28,74	-0,86	-3	29,52	0,07	0,25
9	6,98	0,00	-6,98		6,98	0	0,04
10	17 008,28	15 855,40	-1 152,88	-7,27	16 004,90	1 003,38	5,9
11	12 983,65	17 146,17	4 162,52	24,28	12 956,06	27,59	0,21
12	4 862,65	4 493,25	-369,41	-8,22	2 273,39	2 589,27	53,25
13	32 217,71	30 995,08	-1 222,63	-3,94	30 343,50	1 874,21	5,82
14	10 634,19	13 512,08	2 877,89	21,3	9 912,62	721,57	6,79
15	6 790,83	7 034,19	243,36	3,46	6 314,75	476,08	7,01
16	108 944,10	109 880,69	936,59	0,85	105 422,99	3 521,11	3,23
17	17 917,99	21 375,06	3 457,07	16,17	16 920,65	997,34	5,57
18	715,55	1 325,52	609,97	46,02	715,55	0	0
ИТОГО	305 326,30	315 005,47	9 679,17	3,07	291 648,41	13 677,89	4,48

5. Впервые разработан прототип СППР в области управления потоками природного газа масштаба ЕСГ, обеспечивающий интеграцию прогнозных моделей, экономических критериев и алгоритмов оптимизации.

СППР ориентирована на решение задач оперативного и краткосрочного планирования с учётом технических ограничений, прогностической информации и стоимостных критериев.

Основой разработанной в рамках диссертационного исследования системы выступает многомодульная архитектура, объединяющая блоки прогнозирования, технических ограничений, экономических параметров и оптимизации. На рисунке 5 представлена концептуальная схема СППР масштаба ЕСГ, включающая механизмы интеграции ретроспективных данных, прогноза потребления, экспортных заявок и ограничений инфраструктуры.



Рисунок 5. Концептуальная схема СППР уровня ЕСГ

Центральным элементом СППР является оптимизационный модуль, основанный на эволюционных алгоритмах. Все предложенные в диссертационной работе подходы и модели интегрированы в рамках эволюционного оптимизационного модуля, который и формирует основу интеллектуальной СППР.

СППР обеспечивает формирование рекомендаций по распределению потоков природного газа, заданий по добыче и закачке в ПХГ, а также поддерживает соблюдение нормативов по запасам газа в балансовых зонах. Экономическая эффективность и адаптивность модели подтверждается возможностью интеграции дополнительных факторов – таких как приоритеты маршрутов, показатели переработки газа на ГПЗ и особенности экспортных контрактов.

В рамках диссертационного исследования проведён обзор существующих отечественных и зарубежных программно-вычислительных комплексов (ПВК), используемых в сфере диспетчерского управления и моделирования ГТС. Несмотря на широкий функционал ряда систем (например, «Астра газ», «Веста», «CorNet», SIMONE и др.), большинство из них не обеспечивает комплексной интеграции экономических и прогностических критериев на уровне всей ЕСГ.

Разработанный автором прототип СППР преодолевает этот барьер, предлагая целостный инструмент поддержки диспетчерских решений, направленный на снижение эксплуатационных затрат при сохранении надежности системы. Он ориентирован на практическое внедрение в инфраструктуру ПАО «Газпром» и учитывает как технологические особенности, так и экономические цели компании.

6. Предложен подход к оценке экономической эффективности внедрения разработанного инструментария, позволяющий, в отличие от принятого на практике директивного подхода, учитывать рассчитанную на основе модели WACC фактическую ставку дисконтирования, отражающую реальную структуру капитала и условия функционирования газотранспортной отрасли.

В исследовании выполнен расчёт разностного денежного потока, отражающего экономический эффект от внедрения СППР по сравнению с базовым сценарием без использования интеллектуальных методов оптимизации. В качестве ключевого критерия применён доходный подход с расчётом приведённой стоимости (NPV) и терминальной стоимости по модели Гордона. Горизонт прогнозирования принят равным 3 годам в связи с высокой макроэкономической неопределённостью.

Особое внимание уделено выбору ставки дисконтирования. Вместо директивной ставки 12% использован усовершенствованный подход на

основе WACC, учитывающий фактическую структуру капитала ПАО «Газпром». Ставка собственного капитала рассчитана по модели CAPM с уточнёнными параметрами: бета-коэффициент, премия за риск и доходность ОФЗ. Такой подход позволяет повысить точность и применимость оценки в контексте газотранспортной отрасли.

По результатам расчётов, экономический эффект от внедрения СППР составил 13,7 млн руб. в сутки (4,48% от базовых затрат), что эквивалентно 5 375,74 млн руб. в год при общих расходах 119,99 млрд руб. Прогнозные значения для расчётов индексации, добычи и ВВП использованы по данным Минэкономразвития РФ на 2025–2027 годы.

Результаты расчета приведённых денежных потоков с учётом WACC и директивной ставки представлены в таблице 5.

Таблица 5. Экономический эффект от внедрения СППР

Показатель	Сценарий	2025	2026	2027	Постпрогнозный период
Чистая прибыль от внедрения СППР, млн руб.	Базовый	4 648,30	5 087,38	5 452,16	5 604,82
	Конс.	4 407,18	4 771,46	5 009,24	5 139,48
Ставка и фактор дисконтирования, рассчитанный по модели WACC	18,320%	0,845	0,714	0,604	
Терминальная стоимость	Базовый				36 114,49
	Конс.				32 694,70
Приведенный денежный поток	Базовый	3 928,60	3 633,97	3 291,54	21 802,76
	Конс.	3 724,81	3 408,30	3 024,14	19 738,19
Итоговый результат для WACC	Базовый				32 656,86
	Конс.				29 895,44
Ставка и фактор дисконтирования	12,000%	0,893	0,797	0,712	
Терминальная стоимость	Базовый				60 922,00
	Конс.				54 675,27
Приведенный денежный поток	Базовый	4 150,27	4 055,63	3 880,74	43 363,08
	Конс.	3 934,98	3 803,78	3 565,47	38 916,78
Итоговый результат	Базовый				55 449,72

Итоговый экономический эффект от внедрения СППР составляет: от 29,9 млрд руб. (WACC, консервативный сценарий) до 55,5 млрд руб. (ставка 12%, базовый сценарий).

Комплексная экономическая оценка подтверждает высокую эффективность и стратегическую целесообразность внедрения СППР в систему диспетчерского управления потоками природного газа в рамках долгосрочной стратегии развития газотранспортной отрасли.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа направлена на решение прикладной научной задачи – разработку моделей и инструментов для повышения точности прогнозирования, оптимизации режимов работы ГТС и поддержки экономически обоснованных решений по управлению потоками природного газа. В исследовании реализованы методы статистической обработки данных, нейросетевые модели прогнозирования расхода топливного газа и подход к многокритериальной оптимизации с учётом экономических и технических факторов.

Применение экономико-статистических и математических методов в ходе исследования выявило ряд концептуальных и методических проблем в обработке технологических данных и построении оптимизационных моделей, для решения которых автором предложены следующие подходы:

– Классические методы выявления аномалий в технологических данных демонстрируют высокий уровень ложных срабатываний, ограничивая их применимость в оперативном управлении. Для повышения надёжности предложена каскадная система проверки – от контроля допустимых границ до нейросетевого анализа. Введён интегральный показатель AIVI для оценки статистико-экономической эффективности системы.

– Традиционные модели расчёта расхода топливного газа, основанные на усреднённых характеристиках, не учитывают локальные режимные особенности, что снижает точность. Разработанные нейросетевые модели с кластеризацией входных данных обеспечивают высокое качество прогнозов. Впервые предложен подход к экономической оценке точности прогнозирования расхода топливного газа.

– Существующие оптимизационные модели, как правило, ограничиваются однокритериальными функциями и не учитывают экономические показатели. Предложен многокритериальный эволюционный алгоритм, обеспечивающий достижение экономического эффекта и допускающий гибкую настройку под различные цели.

– Использование фиксированной ставки дисконтирования может исказить оценку эффективности внедрения. В работе предложен метод её обоснования на основе расчёта WACC с учётом структуры капитала ПАО «Газпром», что обеспечивает адаптацию к отраслевой специфике и усиливает достоверность результатов.

Разработанные решения обеспечивают точное прогнозирование расхода топливного газа, учитывают экономические показатели при планировании и интегрируют технологические и стоимостные факторы в процесс принятия решений. Моделирование и апробация подтвердили их экономическую эффективность. Полученные подходы могут быть внедрены в практику ПАО «Газпром» и использоваться в рамках цифровизации управления ЕСТ.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Ланин, С. Н. Методы идентификации ошибок и аномалий в технологических данных предприятий газовой промышленности /С.Н. Ланин // *Финансы и бизнес*. – 2025. – Т. 21, № 1. – С. 82–96. – DOI: 10.31085/1814-4802-2025-21-1-144-82-96. – EDN ZDZZCW. – 1,01 п.л.

2. Ланин, С. Н. Оперативное прогнозирование расхода топливного газа в газотранспортных обществах ПАО «Газпром» /С.Н. Ланин, А.А. Кудрявцев // *Экономика промышленности*. – 2024. – Т. 17, № 4. – С. 401–423. – DOI: 10.17073/2072-1633-2024-4-1346.– 1,90 п.л. / 1,52 п.л.

3. Ланин, С. Н. Управление логистикой природного газа с использованием методов многокритериальной оптимизации /С.Н. Ланин // *Цифровые модели и решения*. – 2024. – Т. 3, № 3. – С. 24–46. – DOI: 10.29141/2949-477X-2024-3-3-2. – EDN ETUDTS. – 1,39 п.л.

4. Ланин, С. Н. Подходы к прогнозированию компонентного состава природного газа в нестационарных системах /С.Н. Ланин // *Индустриальная экономика*. – 2024. – № 6. – С. 84–93. – DOI: 10.47576/2949-1886.2024.6.6.013. – EDN CANDSD. – 0,74 п.л.

5. Ланин, С. Н. Стоимостная оптимизация газотранспортных потоков на основе методов машинного обучения и эволюционных алгоритмов /С.Н. Ланин // *Социальные и экономические системы. Экономика*. – 2025. – № 2. – С. 134–158. – 0,94 п.л.

6. Ланин, С. Н. Управление качеством природного газа для минимизации финансовых рисков экспортных операций /С.Н. Ланин // *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. – 2024. – № 5 (149). – С. 151–155. – 0,34 п.л.

7. Ланин, С. Н. Моделирование и прогнозирование расхода топливного газа в магистральных газопроводах: новые подходы /С.Н. Ланин // Цифровое моделирование экономики. – 2025. – № 1 (5). – С. 28–30. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://digsimeco.ru/786> (дата обращения: 02.04.2025). – 0,42 п.л.

8. Ланин, С. Н. Экономические аспекты управления компонентным составом природного газа для обеспечения поставок на территорию Турецкой Республики /С.Н. Ланин // Конкуренция хозяйственных систем евразийского и западно-европейского типа: сб. науч. ст. по итогам VIII междунар. науч. конф., Санкт-Петербург, 19–20 окт. 2023 г. – СПб.: СПбГЭУ, 2023. – С. 377–382. – EDN DMTZSW. – 0,32 п.л.

9. Ланин, С. Н., Информационные системы как основа интенсивного развития рынка газа в условиях ограничений /С.Н. Ланин, А.А. Кудрявцев // Информационные технологии в экономике: материалы Всерос. интернет-конф., 27–28 марта 2025 г., Луганск. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля, 2025. – С. 1341–1344. – 0,19 п.л. / 0,15 п.л.

10. Ланин, С. Н. Подходы к прогнозированию расхода топливного газа для повышения операционной эффективности деятельности газотранспортного предприятия /С.Н. Ланин, Е.М. Дедов // Научный форум: экономика и менеджмент. – 2024. – № 7 (84). – С. 36–42. – 0,68 п.л. / 0,54 п.л.

11. Ланин, С. Н. Перспективы использования искусственного интеллекта в газотранспортной отрасли Российской Федерации /С.Н. Ланин // Искусственный и естественный интеллект: алгоритмы, мышление и образовательные технологии: материалы XXI междунар. конгр. с элементами науч. школы для молодых ученых, Москва, 27–28 марта 2025 г. В 2 т. Т. 1. – М.: МУ им. С. Ю. Витте, 2025. – С. 218–228. – ISBN 978-5-9580-0789-9. – 0,60 п.л.

12. Ланин, С.Н. Подходы к детекции аномалий во временных рядах параметров газотранспортных потоков. / С. Н. Ланин // Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей «Энергетика и автоматизация в современном обществе» / Минобрнауки РФ; ФГБОУ ВО «Санкт-Петерб. гос. ун-т промышленных технологий и дизайна». – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2025. – С. 13–20. – 0,55 п.л.

13. Ланин, С. Н. Пути оптимизации качественных характеристик природного газа для повышения эффективности его реализации /С.Н. Ланин // Государственное управление и менеджмент: материалы XII Международной научной конференции (г. Нижний Новгород, 13 декабря 2024 г.). – Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2025. – С. 115–120. – 0,29 п.л.

14. Ланин, С. Н. СППР для экономически обоснованного краткосрочного планирования потоков газа / С. Н. Ланин // Актуальные вопросы развития управления, экономики и права в современных условиях: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции (г. Уфа, 31 марта 2025 года). – Уфа: ГБОУ ВО «БАГСУ», 2025. – С. 247–251. – 0,22 п.л.