

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

На правах рукописи

Костандян Артур Валериевич

**Автоматизированная система контроля и идентификации источников небаланса
газа в газотранспортной системе**

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре кибернетики химико-технологических процессов в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Егоров Александр Фёдорович, профессор кафедры кибернетики химико-технологических процессов ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени им. Д. И. Менделеева»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
Богатиков Валерий Николаевич

ФГБОУ «Тверской государственный
технический университет», профессор
кафедры Информационных систем

кандидат технических наук,
Пащенко Александр Федорович

ФГБУН Институт Проблем Управления
им. В. А. Трапезникова РАН, старший
научный сотрудник, заведующий
лабораторией 40 «Интеллектуальных
систем управления и моделирования»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»

Защита состоится «03» октября 2024 г. в 11.00 на заседании диссертационного Совета РХТУ 2.6.09 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Миусская пл., д. 9, ауд. 443, конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре и на официальном сайте <https://www.muctr.ru> федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева».

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного
Совета РХТУ 2.6.09

Кандидат технических наук, доцент

В. А. Василенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из ключевых задач эффективности функционирования трубопроводной газотранспортной системы является поддержание сбалансированных режимов транспортировки природного газа.

Принятие решений по управлению режимами трубопроводной газотранспортной системы (ТГТС) осуществляется на основе обработки большого объема информации (структурированные и неструктурированные большие массивы данных, относящихся к классу больших баз данных), от средств измерений измерительной системы (ИС) параметров газа и анализа результатов на определенном временном интервале.

Качество и эффективность системы газоснабжения определяются величиной небаланса природного газа и выступают главными критериями эффективного учета поставляемого газа. По оценке влияния факторов возникновения небаланса газа в газотранспортных системах существует ряд публикаций.

В связи с этим особенно важную роль приобретают подходы к управлению ТГТС, основанные на построении информационных систем идентификации причин и источников небаланса природного газа. Эффективность системы управления ТГТС достигается применением математических методов и моделей, разработкой специальных систем идентификации причин и источников небаланса ПГ на основе современных информационных технологий для поддержки оперативного принятия решений.

В то же время отсутствуют примеры системного решения и реализации задач оперативной идентификации причин и источников небаланса природного газа, обеспечивающих принятие решений для эффективного управления газотранспортными системами. Данная проблема актуальна и в настоящее время.

В работе отмечен и проанализирован вклад отечественных и зарубежных учёных в научные исследования, связанные с данной работой:

– Теоретические основы математических методов, компьютерного моделирования и оптимизация режимов сложных технологических систем разработаны в трудах: академика АН СССР и РАН РФ Кафарова В. В., академика РАН РФ Мешалкина В. П., профессоров Егорова А. Ф., Савицкой Т. В.;

– Математические методы, вычислительные алгоритмы моделирования и оптимизации режимов транспорта газа разработаны в трудах профессоров Меренкова А. П., Новицкий Н. Н., Сарданашвили С. А., Ставровский Е. Р., Сухарев М. Г., Тодина Е., Хасилев В. Я., Чарный И. А.;

– Программно-вычислительные комплексы поддержки принятия диспетчерских решений при управлении ТГТС разработаны в трудах профессоров: Берман Р. Я., Григорьев Л. И., Панкратов В. С., Сарданашвили С. А., Селезнев В. Е., Степин Ю. П., Сухарев М. Г.;

– Разработка математических моделей, связанных с неучтенным газом при сведении материальных балансов природного газа в трубопроводных газотранспортных сетях разработаны в трудах: F. Arpino, L. Celenza, R. D'Alessio, M. Dell'Isola, G. Ficco.

Степень разработанности темы. Природный газ является стратегическим видом топлива, который требует к себе бережного и рачительного отношения, достоверного учета и контроля. В отечественной науке отсутствуют практические исследования, посвященные вопросам идентификации причин небаланса газа и коммерческих потерь поставщика газа при транспортировке до конечного потребителя.

В связи с этим особенно важную роль приобретают подходы к управлению ТГТС, основанные на построении информационных систем идентификации причин и источников небаланса природного газа. Эффективность системы управления ТГТС достигается применением математических методов и моделей, разработкой специальных систем идентификации причин и источников небаланса ПГ на основе современных информационных технологий для поддержки оперативного принятия решений.

В работе отмечен и проанализирован вклад отечественных и зарубежных учёных в разделы науки, связанных с темой диссертационного исследования: Теоретические основы математических методов, компьютерного моделирования и оптимизация режимов сложных технологических систем разработаны в трудах: академика АН СССР и РАН РФ Кафарова В. В., академика РАН РФ Мешалкина В. П., профессоров Егорова А. Ф., Савицкой Т. В. Математические методы, вычислительные алгоритмы моделирования и оптимизации режимов транспорта газа разработаны в трудах профессоров Меренкова А. П., Новицкий Н. Н., Сарданашвили С. А., Ставровский Е. Р., Сухарев М. Г., Тодина Е., Хасилев В. Я., Чарный И. А.; Программно-вычислительные комплексы поддержки принятия диспетчерских решений при управлении ТГТС разработаны в трудах профессоров: Берман Р. Я., Григорьев Л. И., Панкратов В. С., Сарданашвили С. А., Селезнев В. Е., Степин Ю. П., Сухарев М. Г.; Разработка математических моделей, связанных с неучтенным газом при сведении материальных балансов природного газа в трубопроводных газотранспортных сетях разработаны в трудах: F. Arpino, L. Celenza, R. D'Alessio, M. Dell'Isola, G. Ficco.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка имитационной модели и алгоритмов идентификации причин и источников небаланса природного газа в трубопроводной газотранспортной системе.

ТГТС представляет собой сложную, иерархически многоуровневую систему с множеством прямых и обратных связей, со сложной кольцевой структурой, содержащей следующие технологические и функциональные подсистемы: источники природного газа; компрессорные станции (КС); линейные участки трубопроводов (ЛУ); газораспределительные станции (ГРС).

Достижение поставленной цели обеспечивается разработкой и созданием системы идентификации источников и причин небаланса газа в ТГТС, решением ряда взаимосвязанных задач, таких как:

- поэтапного моделирования ТГТС с параллельной верификацией измерительной системы в режиме реального времени;
- оценка причин небаланса газа в ТГТС с учетом недостоверности информации;
- разработка логической схемы локализации причин небаланса на линейных участках (ЛУ) ТГТС (исправность ИС, неучтенные потери из-за утечек на ЛУ) и алгоритма расчета имитационной модели, как инструмента идентификации мест утечек природного газа на ЛУ ТГТС;
- моделирования онлайн мониторинга измерительной системы (ИС), основанного на использовании автоассоциативных нейронных сетей (ААНС) с использованием аппарата статистического анализа и автоматической классификации (группировки) измерений по их принадлежности к различным режимам технологического процесса;
- информационно-экспертной поддержки формирования и принятия решений для устранения причин (в части измерительной информации), в том числе:
 - разработка автоматизированной системы контроля и оперативного управления объектами ТГТС с целью экспертной оценки возможных причин небаланса ПГ и принятия решений в режиме реального времени;
 - оценка погрешности используемых средств измерений, непосредственно участвующих в расчете баланса ТГТС;

Научная новизна работы. На основе современных подходов и методов оценки эффективности сбалансированной работы газотранспортной системы научная новизна заключается в следующем:

- Предложен комплексный подход к анализу режимов работы ТГТС и причин небаланса транспорта природного газа, базирующийся на построении имитационной модели с учетом характеристик компрессоров.
- Разработана модель анализа режимов ТГТС и идентификации возможных источников и причин возникновения небаланса природного газа.
- Разработана логическая схема локализации причин небаланса на линейных участках ТГТС и итерационный алгоритм идентификации мест утечек природного газа на линейных участках трубопроводов.
- Разработана интеллектуальная система диагностики ИС и оценки достоверности измерений в режиме реального времени, коррекции грубых измерений.

Теоретическая значимость. Разработаны экспериментально-аналитические модели и алгоритмы:

- оценки достоверности измерительной информации (обнаружение грубых ошибок) и ее восстановления;
- интеллектуальной системы калибровки и корректировки показаний измерительной системы в онлайн режиме;
- идентификации и локализации мест утечек в трубопроводах транспортировки жидких и газообразных углеводородов методом фильтра частиц;
- оперативного обнаружения источников небаланса газа в ТГТС.

Практическая значимость. Разработанная система, предназначена для объектов нефтегазовой отрасли, включает следующие функциональные модули:

- Разработаны алгоритмы и программный комплекс идентификации источников и причин небаланса газа в ТГТС:
- статистического анализа данных ИС, идентификации грубых ошибок и источников небаланса газа ТГТС;
- идентификации и локализации утечек в трубопроводной системе транспортировки природного газа (моделирование и отладка программного комплекса осуществлялось на данных участка ТГТС ООО «Газпром трансгаз Волгоград»;
- идентификации причин небаланса на линейных участках ТГТС;
- онлайн-мониторинга элементов ИС с использованием автоассоциативной нейронной сети (ААНС) и аппарата статистического анализа исходных данных для группировки по их принадлежности к режимам технологического процесса для корректной самокоррекции в ААНС ошибочных измерений для каждой из этих групп.

Рекомендованы к внедрению на газотранспортных предприятиях ПАО «Газпром» система оперативного обнаружения источников и причин небаланса газа, его устранение, контроль и регулирование в режиме реального времени, которая обеспечит высокое качество функционирования ТГТС и станет неотъемлемой составляющей системы автоматизированного диспетчерского управления.

Методология и методы исследования. Решение поставленных в диссертации задач основано на использовании современных методов и теорий: имитационного моделирования, идентификации, управления, надежности и эффективности функционирования газотранспортных систем, прогнозирования, математической статистики и программных систем.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель ТГТС, с целью определения причин и источников небаланса природного газа в ТГТС.
2. Алгоритм идентификации источников и причин небаланса и мест утечек газа на линейных участках ТГТС.

3. Алгоритм статистического анализа данных ИС и идентификации источников небаланса газа в ТГТС.
4. Математические модели и алгоритмы обнаружения и локализации утечек в трубопроводах транспортировки природного газа и нефтепродуктов.
5. Подсистема диагностики и калибровки ИС в режиме реального времени на основе ААНС.

Достоверность результатов исследования основана на использовании реальных данных ТГТС: месячные данные по суточным объемам транспортировки природного газа, давление и температура на входе и выходе КС за каждые два часа; методы анализа данных и оценки грубых ошибок; современные подходы согласования данных; нейросетевые технологии корректировки (восстановления) измерений.

Личный вклад автора заключается в проведении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая обработку и обобщение экспериментальных и теоретических исследований, разработку математических моделей, алгоритмов и программ их реализации, анализ и оформление результатов в виде научных публикаций и докладов на международных научных конференциях.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на научных конференциях: «Системы синхронизации, генерации и обработки сигналов в телекоммуникациях (SYNCHROINFO)», Минск, Беларусь, 2018; XXXV Международной научной конференции «Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ-35, Ярославль, 2022 г.; VI Международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования» Инфорно-2022, Москва, 2022 г.; VII региональной научно-технической конференции «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России», Москва, 2023 г.; LXX Международной научно-практической конференции «Научный форум: технические и физико-математические науки», Москва, 2024.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, отражающие ее основные научные результаты, в том числе одна статья, индексируемая в международной базе данных Scopus, 7 публикаций в рецензируемых изданиях. Получено свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2023689075 от 26.12.2023 г.

Структура и объём работы.

Диссертационная работа включает в себя введение, пять глав, выводы, список используемой литературы. Общий объем диссертации составляет (188) страниц, включающие (48) рисунков, (14) таблиц и одно Приложение. Список цитируемой литературы содержит (179) наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено общее состояние проблемы небаланса природного газа в ГТС, обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели исследования, изложена научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрены подходы к анализу и идентификации причин и источников небаланса природного газа в ТГТС. Приведен обзор методик расчета и контроля неучтенного ПГ в сети газотранспортной системы. Представлены основные математические модели газотранспортной системы для расчетов и анализа режимов работы ТГТС и оценки возможных причин возникновения небаланса ПГ. Представлен обзор теоретических методов оценки достоверности измерительной информации при сведении материального баланса в ТГТС и сформулированы задачи диссертационной работы. Показано обоснование важности и необходимости процедуры согласования данных при оптимизации управления процессами ТГТС и сведении материальных балансов в режиме реального времени. Разработка и внедрение системы оперативного обнаружения источников и причин небаланса транспортируемого природного газа в режиме реального времени обеспечат высокое качество функционирования ТГТС и станут неотъемлемой составляющей системы автоматизированного оперативно-диспетчерского управления.

Во второй главе сформулирована постановка задачи и разработана математическая модель транспортировки природного газа в газопроводных сетях с учетом динамики и допущением изотермического процесса Эйлера, основанная на сохранении массы и импульса при постоянстве энергии. Одномерное изотермическое уравнение Эйлера в пространственной области $[0, L]$ задаётся следующим образом

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho = - \frac{\partial}{\partial x} \varphi, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi = - \frac{\partial}{\partial x} p - \frac{\partial}{\partial x} (\rho v^2) - g\rho \frac{\partial}{\partial x} h - \frac{\lambda(\varphi)}{2d} \rho v |v|, \quad (2)$$

$$p = v(T)z(p, T)\rho \quad (3)$$

где ρ - плотность газа (кг/м^3), v - скорость газа (м/с), $\varphi = \rho v$ - скорость прохождения потока 1 кг/с через поперечное сечение в 1 м^2 , d - диаметр трубы (м), λ - коэффициент трения газа, p - давление газа (Н/м^2), T - температура газа ($^\circ\text{К}$), z - коэффициент сжимаемости. Сохранение массы и импульса представлены в (1) и (2), соответственно, уравнение состояния (3) отображает взаимосвязь давления и плотности.

Используя выражение массового потока $q = a\varphi$, где a - площадь поперечного сечения трубы после подстановки в уравнения (1) и (2), получаем

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho = - \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial x} q, \quad (4)$$

$$\frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial t} q = - \frac{\partial}{\partial x} p - \frac{1}{a^2} \frac{\partial}{\partial x} \frac{q^2}{\rho} - g \rho \frac{\partial}{\partial x} h - \frac{\lambda(q)}{2da^2} \frac{q|q|}{\rho}, \quad (5)$$

$$p = v(T)z(p, T)\rho \quad (6)$$

Для изотермического случая, при температуре $T = T_0$ во всей сети,

$$v(T) = v(T_0) = v_0 \text{ и } z(p; T) = z(p; T_0) = z_0(p), \text{ поэтому коэффициент сжимаемости } z(p; T)$$

связан только с давлением p и систему уравнений (4), (5) и (6) можно представить как:

$$\frac{1}{v_0} \frac{\partial}{\partial t} \frac{p}{z_0(p)} = - \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial x} q, \quad (7)$$

$$\frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial t} q = - \frac{\partial}{\partial x} p - \underbrace{\frac{v_0}{a^2} \frac{\partial}{\partial x} \frac{q^2 z_0(p)}{p}}_{\text{фактор инерции}} - \underbrace{\frac{g}{v_0 z_0(p)} \frac{\partial}{\partial x} h}_{\text{фактор гравитации}} - \underbrace{\frac{\lambda(q) \gamma v_0}{2da^2} z_0(p) \frac{q|q|}{p}}_{\text{фактор трения}}, \quad (8)$$

При предположении постоянства высот надземных труб, гравитационным фактором в (8) можно пренебречь. В этом случае модель, динамики изотермического режима транспортируемого газа по однородным наземным газопроводам имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{p}{z_0(p)} = - \frac{\gamma_0}{a} \frac{\partial}{\partial x} q, \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} q = -a \frac{\partial}{\partial x} p - \frac{\lambda(q) \gamma_0}{2da} z_0(p) \frac{q|q|}{p}, \quad (10)$$

Динамика несжимаемого газа, транспортируемого по трубопроводам, описывается одномерным изотермическим уравнением Эйлера ($z_0(p)=1$) в пространстве координат по длине линейного участка $[0; L]$ с однородной высотой.

Согласно (9) и (10) имеем

$$\frac{\partial}{\partial t} p + \frac{c}{a} \frac{\partial}{\partial x} q = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} q + a \frac{\partial}{\partial x} p + \frac{c \lambda}{2da} \frac{q|q|}{p} = 0 \quad (12)$$

Для упрощения вводим обозначение $c = \gamma_0$ и предполагаем, что $\lambda(q) \equiv \gamma_0$. Система уравнений (11), (12) является нелинейной по фактору трения.

Для газотранспортных трубопроводов граничное условие в точке $x = 0$ задается предписанным давлением p_s , в то время как граничное условие в точке на выходе ЛУ $x=L$ задается массой q_d (потребность в газе). Поэтому граничные условия для (11) и (12) задаются в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} p = p_s, \text{ при } x = 0 \\ q = q_d, \text{ при } x = L \end{array} \right\}, \quad (13)$$

Также в главе 2 представлено использование метода фильтра частиц для оценки параметров транспортируемого природного газа, нефти, нефтепродуктов по трубопроводу: давления, массового расхода и плотности по длине трубопровода. Основным преимуществом фильтра частиц является достаточно точная оценка неизвестного состояния, даже если модель является сильно нелинейной, а шум негауссовым. Основное различие между методами прогнозирования по модели

и оценки с помощью ФЧ заключается в том, что в случае ФЧ, прогнозируемые состояния обновляются с помощью доступных измерений. Таким образом, оценка параметров режима трубопроводной транспортировки методом фильтра частиц более достоверна и достоверна чем предсказанные по модели.

Модель представлена ниже:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{C_{son}^2}{A} \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} \left(1 - \frac{v^2}{C_{son}^2} \frac{W^2}{A^2}\right) + 2v \frac{W}{A^2} \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{2vW|W|}{A^2 D} f + \frac{g}{v} \sin\theta = 0, \quad (15)$$

Дискретная форма модели имеет вид:

$$\begin{aligned} p_{i,j} &= \frac{1}{2} (p_{i-1,j-1} + p_{i+1,j-1}) + \frac{C_{son}}{2A} (W_{i-1,j-1} - W_{i+1,j-1}) \\ &+ \Delta t \frac{C_{son} f}{A^2 D} (v_{i+1,j-1} W_{i+1,j-1} |W|_{i+1,j-1} - v_{i-1,j-1} W_{i-1,j-1} |W|_{i-1,j-1}) \\ &+ \Delta t \frac{C_{son}}{2} g \sin\theta \left(\frac{1}{v_{i+1,j-1}} - \frac{1}{v_{i-1,j-1}} \right), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} W_{i,j} &= \frac{1}{2} (W_{i-1,j-1} + W_{i+1,j-1}) + \frac{A}{2C_{son}} (p_{i-1,j-1} - p_{i+1,j-1}) \\ &+ \Delta t \frac{A}{2} \frac{2f}{A^2 D} (v_{i+1,j-1} W_{i+1,j-1} |W|_{i+1,j-1} + v_{i-1,j-1} W_{i-1,j-1} |W|_{i-1,j-1}) \\ &+ \Delta t \frac{A}{2} g \sin\theta \left(\frac{1}{v_{i+1,j-1}} + \frac{1}{v_{i-1,j-1}} \right), \end{aligned} \quad (17)$$

где: p – давление в трубопроводе, Па; C_{son} – скорость звука в транспортируемой среде в трубопроводе, м/с; A – площадь поперечного сечения трубопровода, м²; W – массовый расход газа, кг/с; f – коэффициент трения трубопровода (коэффициент трения Фаннинга); D – диаметр трубопровода, м; Δt – шаг по времени для выборки, с; $v = 1/d$ – удельный объем, м³/кг; d – плотность газа, кг/м³; g – гравитационное ускорение, м/с²; θ – угол возвышения от поверхности земли, градус; i – количество узлов пространства; j – номер временного узла.

В третьей главе представлены алгоритмы контроля баланса газа в трубопроводной газотранспортной системе и идентификации причин возможного небаланса и формирования рекомендаций по устранению причин небаланса газа для эффективного управления ТГТС.

Уравнение баланса транспорта природного газа в узлах ТГТС в общем виде представлено следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n Q(t_u)_{\text{пост } i} - \sum_{j=1}^m Q(t_u)_{\text{потр } j} - \sum_{k=1}^d Q(t_u)_{\text{тр } k} - Q(t_u)_{\text{стн}} + \Delta Q_{\text{ЗГС}} = 0, \quad (18)$$

$$\Delta Q_{\text{ЗГС}} = Q(t_u)_{\text{ЗГС}} - Q(t_{u-1})_{\text{ЗГС}}, \quad (19)$$

где $Q(t_u)_{\text{пост } i}$ – объем газа с i -го узла измерения расхода газа (УИРГ), поступившего в ТГТС со смежных газотранспортных (ГТО) и газоперерабатывающих (ГПО) обществ, тыс. м³/сутки; $Q(t_u)_{\text{потр } j}$ – объем газа, распределенного потребителям через j -ю газораспределительную станцию (ГРС), тыс. м³/сутки; $Q(t_u)_{\text{тр } k}$ – объем газа, покинувшего ГТС через k -й УИРГ на границе со смежными ГТО и ГПО, тыс. м³/сутки; $Q(t_u)_{\text{стн}}$ – объем газа, израсходованного на собственные технологические нужды, тыс. м³/сутки; $\Delta Q_{\text{ЗГС}}$ – изменение запаса газа в ГТС за определенный интервал времени, тыс. м³/сутки; t_u – u -е сутки ($u = 1, 2, \dots, n$), сутки.

Одним из важных показателей эффективности функционирования ТГТС служит создание подсистемы оперативного обнаружения источников и причин небаланса газа «вход – выход», их устранение, контроль и регулирование производственной ситуации в режиме реального времени.

Математическая формулировка и структура уравнений, моделирующих ТГТС, зависит от топологии последней, природы газа и внутреннего состояния труб (коррозия).

Укрупненная блок-схема последовательности решения задачи идентификации причин и источников небаланса газа в газотранспортной системе приведена на рисунке 1.

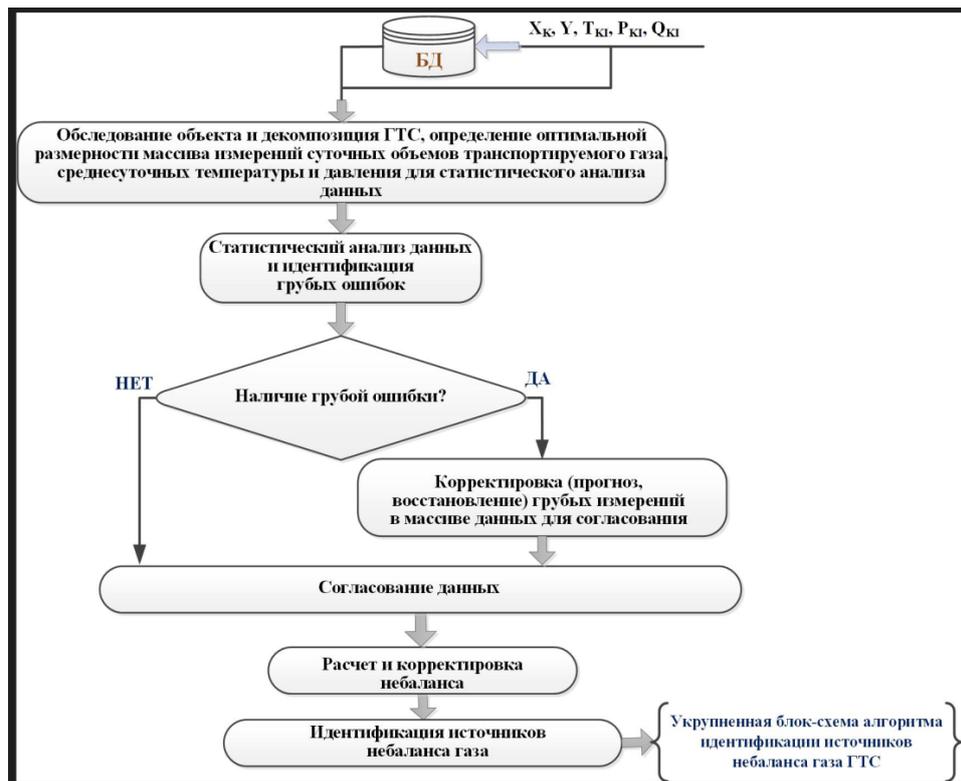


Рисунок 1 - Укрупненная блок-схема этапов решения задачи идентификации причин и источников небаланса газа в ТГТС

Уравнения баланса массы формируются на основе принципа сохранения массы и энергии на каждом стыке (узле) ТГТС. В любом узле ТГТС обобщенное уравнение баланса массы для n входных, m выходных труб и накопленного запаса газа в трубах ТГТС k , может быть представлено как:

$$\sum_{i=1}^{i=n} Q_i - \sum_{j=1}^{j=k} q_j - \sum_{l=1}^{l=k} D_l = 0 \quad (20)$$

где $Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n$ – потоки, входящие в узел s (трубы), $q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_m$ – выходные потоки s узла, $D_1, D_2, \dots, D_l, \dots, D_k$ – накопление (запасы) природного газа в ТГТС.

Если все скорости потока через входящие и исходящие трубы неизвестны, то функциональное представление уравнения (20) принимает форму:

$$f(Q_1, Q_2, \dots, Q_t, q_1, q_2, \dots, q_u) = 0, \quad (21)$$

На основе топологии поточной схемы производства и закона сохранения массы, система уравнений материального баланса имеет линейную структуру вида $AY^T=B$, где A – матрица коэффициентов связи, принимающая значения $-1, 0, +1$; Y – вектор потоков масс и изменений запасов в трубопроводах.

В четвертой главе представлена платформа информационных технологий построения системы, генерирующей знания об объекте управления, в которых возможна работа в режиме оффлайн, так и в режиме реального времени и ее адаптации к изменениям в объекте. Разработан алгоритм оценки достоверности измерений в режиме реального времени для решения проблемы диагностики измерительной системы и коррекции грубых измерений.

На рисунках 2 представлена укрупненная блок-схема алгоритма функционирования системы диагностики ИС.

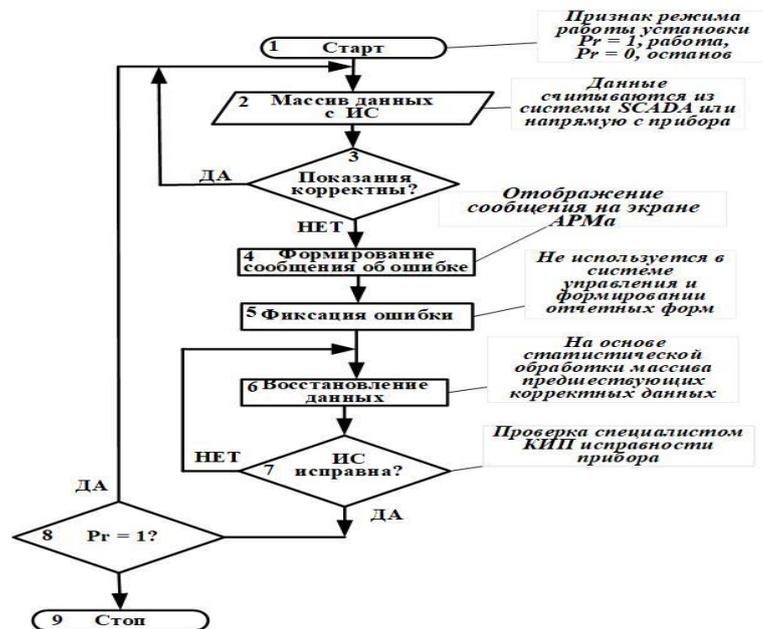


Рисунок 2 - Укрупненная блок-схема диагностики измерительной системы

Подсистема контроля калибровки приборов на основе ИНС состоит из следующих основных модулей: обучения оценки измерений, использующий архитектуру автоассоциативной нейронной сети (ААНС) Хопфилда; статистического анализа и принятия решений, основанный на последовательном тестировании и оценки взаимной корреляции (ковариации) измеренных и

оценочных значений ИНС; модуля коррекции показаний неисправной ИС; настройки ИНС.

Укрупненная блок-схема подсистемы калибровки и верификации показана на рисунке 3.

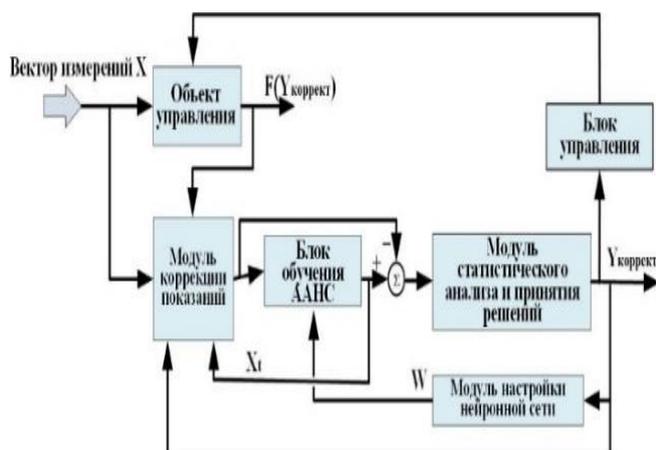


Рисунок 3 - Укрупненная блок-схема подсистемы калибровки, верификации и управления

Онлайн-мониторинг элементов ИС, основан на использовании ААНС с использованием аппарата статистического анализа исходных данных для группировки по их принадлежности к режимам технологического процесса для корректной самокоррекции ошибочных измерений для каждой из этих групп.

Обучение ААНС заключается в непрерывной коррекции весовых коэффициентов связей (синапсов) в модуле настройки нейронной сети до тех пор, пока не будет устойчивое решение, являющееся признаком обученности сети. Выходной вектор рекуррентно формируется в результате процесса обучения ААНС и репродуцирования входного вектора на выходе в соответствующем динамическом диапазоне.

Укрупненный алгоритм работы ААНС состоит из двух стадий: обучения и практического использования.

I. Стадия обучения:

1. Формирование матрицы эталонных образов $X_{ij}(0), Y_i(0)$;
2. Расчет матрицы весовых коэффициентов, уравнение.

II. Стадия практического использования:

1. На вход ААНС подается зашумленный вектор-столбец измерений $\bar{X}, i = \overline{1, N}$. Выходам нейронов присваиваются соответствующие значения входного вектора $Y(0) = X(0)$;
2. Пересчет состояния нейронов и расчет выходного вектора ААНС

$$Y_i(t+1) = \text{sign} \left[\sum_{j=1}^N w_{ij} Y_j(t) \right], \quad (22)$$

Каждый нейрон может быть в одном из двух состояний $Y_i(t) \in \{-1; +1\}$.

3. Сравнение на каждом этапе итерации t и $t+1$ сходимости и устойчивости образов на выходе ААНС и оценка «невязки» с допустимым порогом ошибки. Если «невязка» в пределах порога ошибки, ААНС обучена, эталонный образ близок входному вектору, если нет, то переход в пункт

2. Может быть и ситуация чередования выходного вектора, являющаяся признаком завершения обучения.

4. После стабилизации ААНС выходной вектор соответствует одному из эталонных образов.

На рисунке 4 представлена упрощенная блок-схема системы мониторинга в режиме реального времени. Входной вектор прямых измерений X преобразуется и восстанавливается в блоке самокоррекции до наилучшей оценки.

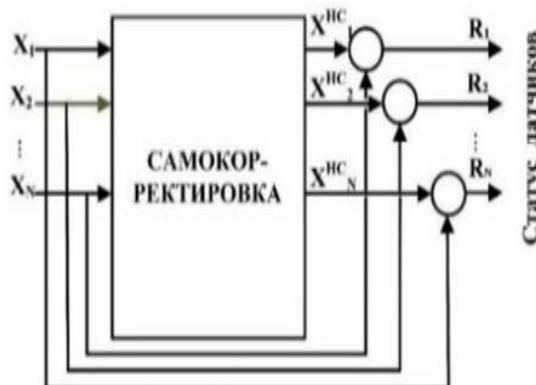


Рисунок 4 - Блок-схема модели системы онлайн мониторинга

Сравнением результирующих векторов $X^{НС}$ и X формируется вектор невязок R (рис. 4), который используется для оценки состояния каждого датчика.

Построение модели самокоррекции включает следующие этапы:

Оценка взаимной корреляции измерений

Степень взаимной корреляции между переменными является важным параметром ААНС. В ситуациях, когда корреляция высока, дрейф, смещение или шум в одном из датчиков ИС не оказывает значительного влияния на реакцию ААНС, потому что его выходные данные связаны со всеми входами посредством большого количества весов и шаблонов.

Степень взаимной корреляции K_{ij} между параметрами i и j определяется корреляционной функцией:

$$K_{ij} = \frac{COV_{ij}}{\sqrt{COV_{ii} * COV_{jj}}}, \quad (23)$$

Коэффициент корреляции двоичных векторов X_j и X_k

$$K_{ik} = \left| \sum_{i=1}^N x_i^j * x_i^k \right|, \quad (24)$$

Для всех M запоминаемых образов обобщенная корреляция имеет вид

$$K = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M K_{jk}, \quad (25)$$

Известно, что не всегда, при измерениях одного и того же параметра коэффициент взаимной корреляции имеет высокую степень из-за неоднородности массива данных, относящихся

к различным режимам работы, поэтому возникает проблема классификации массива измерений по их принадлежности к технологическим режимам.

Распознавание и автоматическая классификация измерений по режимам обеспечивает лучшую аппроксимацию измерений и величину K_{ij} . Таким образом группы измерений формируются по признаку принадлежности к технологическим режимам.

Достаточно высокая степень взаимной корреляции измерений во входном векторе нейронной сети, как избыточная информация, является фактором надежности процедуры обучения. В результате любой конкретный сетевой выход практически не показывает изменений, если соответствующий вход был искажен шумом, ошибочными или отсутствующими данными, что является свойством робастности ААНС. Это свойство позволяет обнаруживать отклонения или отказы датчиков, сравнивая измерения (сетевые входы) с соответствующими сетевыми оценками значений датчиков (сетевые выходы).

Предварительная обработка данных

После определения подгрупп измерений ИС перед обучением нейронной сети в базе данных необходима фильтрация грубых измерений, восстановление и нормирование.

Оценка количества нейронов

Сложность ААНС определяется количеством нейронов в слое узких мест. Хотя количество нейронов в слоях отображения и обратного отображения влияет на производительность нейронной сети, количество нейронов в слое узкого места оказывает более значительное влияние на качество обучения ИНС.

Сеть обучается с помощью базы данных, содержащей также неполные (искаженные) данные.

В диссертационной работе сформулированы основные требования к автоматизированной интеллектуальной системе контроля и идентификации источников небаланса ПГ в газотранспортной системе.

Разработана интеллектуальная автоматизированная система контроля и управления сетями газопроводов, функциональная структура которой приведена на рисунке. 5.

Двухуровневая архитектура системы посредством передачи данных повышает интеллектуальность управления газопроводной сетью в целом.

Интеллектуальное прогнозирование осуществляется на основе методов статистического анализа и искусственных нейронных сетей, приведенных в работе.

В интеллектуальной системе используются реализованные в диссертационной работе:

- математические модели и алгоритмы идентификации утечек природного газа, а также программный комплекс идентификации и локализации утечек в трубопроводах газотранспортной системы;

– программный модуль «Статистика» оценки грубых ошибок измерения и их корректировки для обеспечения достоверности данных измерительной системы.

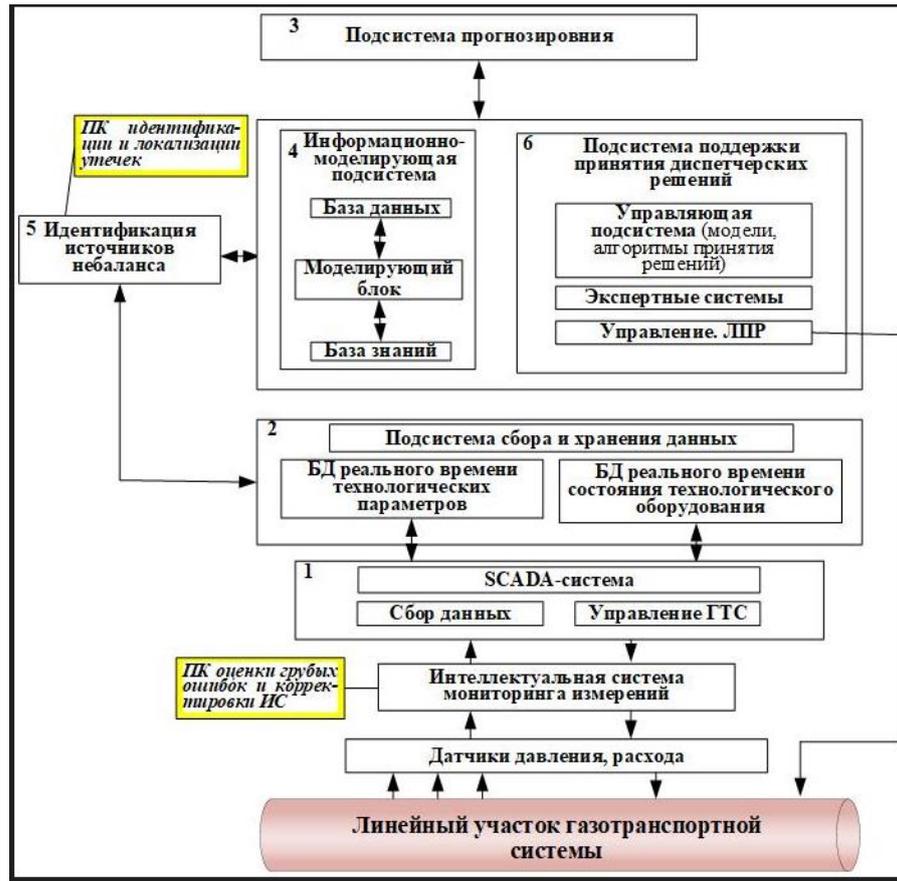


Рисунок 5 - Функциональная структура автоматизированной системы контроля и идентификации источников небаланса в газотранспортной системе

В пятой той главе представлены результаты моделирования утечек и их локализации в газопроводе. Также представлены результаты оценки корректировки грубых измерений в процессе управления газотранспортными системами.

Результаты моделирования по узлам газопровода

Уклон 0 градусов

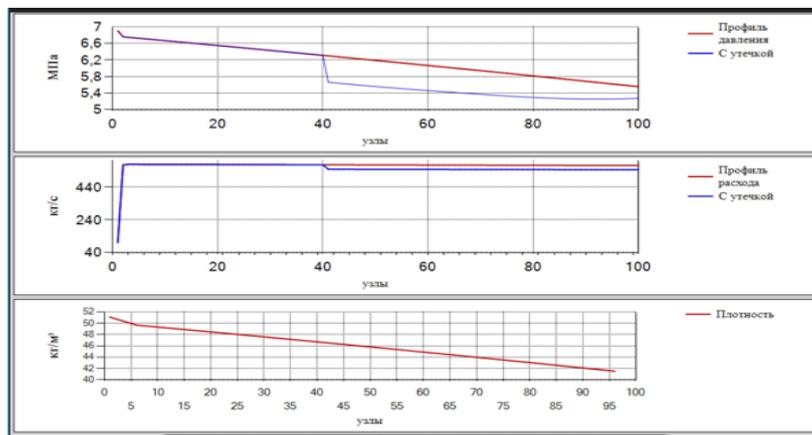


Рисунок 6 - Профиль давления, расхода и плотности по длине газопровода

Таблица 1 - Результаты моделирования без и с утечкой в трубопроводе

Узлы	Значения P, МПа	Значения P _у , МПа	Значения Q, м ³ /с	Значения W, кг/с	С утечкой Q _у , м ³ /с	С утечкой W _у , кг/с
0	6,90	6,90	133,33	100,00	133,33	100,00
5	6,71	6,71	771,01	578,26	771,01	578,26
10	6,65	6,65	770,61	577,96	770,61	577,96
15	6,59	6,59	770,18	577,63	770,18	577,63
20	6,53	6,53	769,71	577,28	769,71	577,28
25	6,47	6,47	769,21	576,91	769,21	576,91
30	6,41	6,41	768,69	576,52	768,69	576,52
35	6,35	6,35	768,15	576,11	768,15	576,11
40	6,29	5,66	767,60	575,70	704,30	548,57
45	6,23	5,60	767,05	575,29	704,10	548,31
50	6,17	5,54	766,50	574,87	703,86	548,03
55	6,11	5,50	765,95	574,46	703,60	547,74
60	6,05	5,45	765,42	574,06	703,34	547,46
65	5,99	5,40	764,90	573,67	703,08	547,18
70	5,93	5,36	764,40	573,30	702,84	546,92
75	5,86	5,32	763,93	572,95	702,60	546,66
80	5,80	5,29	763,48	572,61	702,35	546,41
85	5,73	5,26	763,06	572,30	702,06	546,15
90	5,67	5,25	762,67	572,00	701,74	545,89
95	5,60	5,26	762,31	571,73	701,36	545,61

Уклон 1 градус

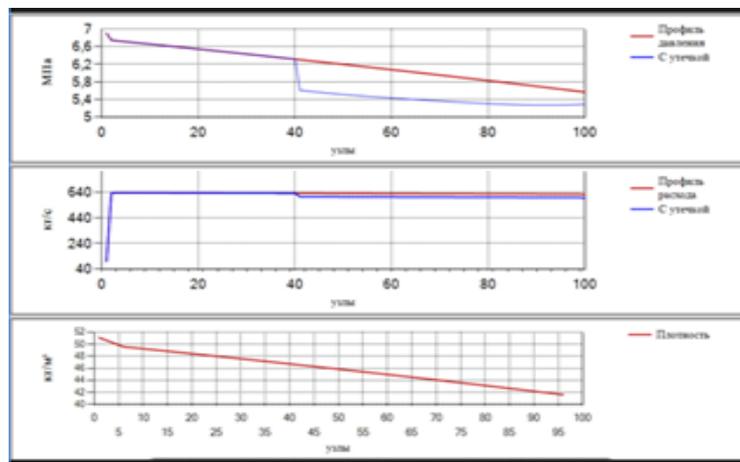


Рисунок 7 - Профиль давления, расхода и плотности по длине газопровода с утечкой в узле 40

Таблица 2 - Результаты моделирования без и с утечкой в трубопроводе

Узлы	Значения P, МПа	Значения P _у , МПа	Значения Q, м ³ /с	Значения W, кг/с	С утечкой Q _у , м ³ /с	С утечкой W _у , кг/с
0	6,90	6,90	133,33	100,00	133,33	100,00
5	6,70	6,70	845,58	634,18	845,58	634,18
10	6,64	6,64	844,91	633,68	844,91	633,68
15	6,58	6,58	844,19	633,14	844,19	633,14
20	6,53	6,53	843,42	632,56	843,42	632,56
25	6,47	6,47	842,60	631,95	842,60	631,95
30	6,41	6,41	841,75	631,31	841,75	631,31
35	6,36	6,36	840,87	630,65	840,87	630,65
40	6,30	5,61	839,97	629,98	776,97	602,98
45	6,24	5,55	839,06	629,29	776,39	602,44
50	6,18	5,50	838,15	628,61	775,76	601,87
55	6,12	5,46	837,24	627,93	775,10	601,30
60	6,06	5,42	836,35	627,27	774,42	600,72
65	6,00	5,39	835,48	626,61	773,75	600,16
70	5,94	5,36	834,64	625,98	773,10	599,61
75	5,88	5,32	833,83	625,37	772,47	599,07
80	5,81	5,30	833,05	624,79	771,85	598,56
85	5,75	5,28	832,31	624,23	771,22	598,05
90	5,68	5,27	831,61	623,71	770,58	597,55
95	5,62	5,27	830,95	623,21	769,90	597,05

16
Уклон 2 градуса

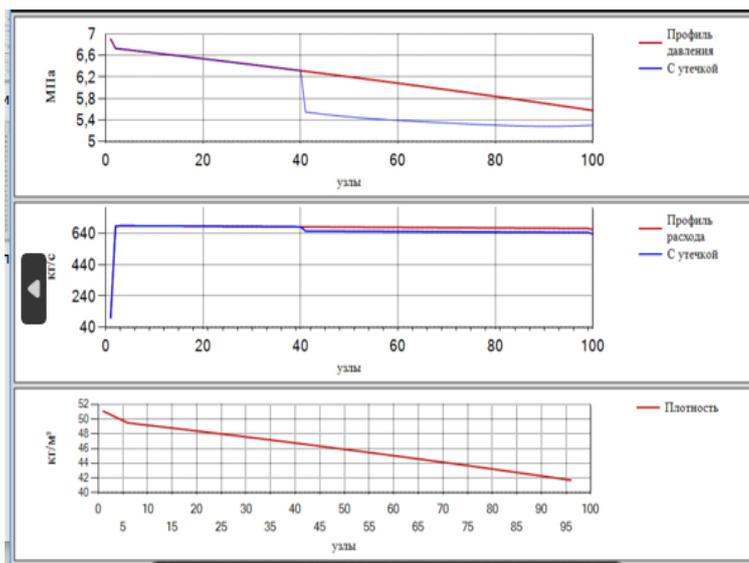


Рисунок 7 - Профиль давления, расхода и плотности по длине газопровода с утечкой в узле 40

Таблица 2 - Результаты моделирования без и с утечкой в трубопроводе

Узлы	Значения P, МПа	Значения P _у , МПа	Значения Q, м³/с	Значения W, кг/с	С утечкой Q _у , м³/с	С утечкой W _у , кг/с
0	6,90	6,90	133,33	100,00	133,33	100,00
5	6,68	6,68	915,20	686,40	915,20	686,40
10	6,63	6,63	914,28	685,71	914,28	685,71
15	6,58	6,58	913,29	684,97	913,29	684,97
20	6,52	6,52	912,22	684,17	912,22	684,17
25	6,47	6,47	911,10	683,32	911,10	683,32
30	6,41	6,41	909,92	682,44	909,92	682,44
35	6,36	6,36	908,70	681,53	908,70	681,53
40	6,30	5,55	907,46	680,59	844,80	653,74
45	6,25	5,49	906,20	679,65	843,86	652,93
50	6,19	5,45	904,93	678,70	842,84	652,09
55	6,13	5,41	903,66	677,75	841,78	651,23
60	6,07	5,39	902,41	676,81	840,69	650,36
65	6,01	5,36	901,18	675,89	839,61	649,50
70	5,95	5,34	899,99	674,99	838,54	648,65
75	5,89	5,32	898,83	674,12	837,50	647,84
80	5,82	5,30	897,71	673,28	836,50	647,05
85	5,76	5,29	896,65	672,48	835,51	646,28
90	5,70	5,28	895,63	671,72	834,53	645,54
95	5,63	5,29	894,67	671,00	833,53	644,80

Результаты идентификации и корректировки грубых ошибок измерений

Давление (МПа) на выходе компрессорной станции через каждые два часа начиная с 01. 11. 2019 в 10:00:0

Ниже, в общей таблице приведены результаты оценки грубых ошибок измерений и их восстановление (корректировка)

Выявленная грубая ошибка в массиве измерений представляется красным шрифтом, восстановленная желтым.

В таблицах 4, 5 массивы данных и критерии оценки грубых ошибок методом Роснера.

Таблиц 4 – Оценка грубых ошибок в массиве критерием Роснера с 1-го измерения

Критерий Роснера									
Число точек выборки	20								
Номер элемента	1								
Вероятность	0,95								
Выборка:									
65,3710	64,2530	63,8780	63,6290	63,5030	63,1930	62,6340	62,0710	61,8220	61,7000
61,3250	61,1410	61,0760	61,1410	61,1410	61,2020	61,2640	61,2640	61,3250	61,3250
Восстановленные данные:									
62,0467	64,2530	63,8780	63,6290	63,5030	63,1930	62,6340	62,0710	61,8220	61,7000
61,3250	61,1410	61,0760	61,1410	61,1410	61,2020	61,2640	61,2640	61,3250	61,3250

Таблиц 5 – Оценка грубых ошибок в массиве критерием Роснера с 38 измерения

Критерий Роснера									
Число точек выборки	20								
Номер элемента	38								
Вероятность	0,95								
Выборка:									
62,3850	63,0050	63,1930	65,0000	65,9950	66,6150	68,1120	68,8580	69,4780	70,3510
70,5390	70,6000	70,7880	71,0360	71,0980	71,3460	71,3460	71,4730	71,4730	71,4730
Восстановленные данные:									
69,7401	69,7401	69,7401	65,0000	65,9950	66,6150	68,1120	68,8580	69,4780	70,3510
70,5390	70,6000	70,7880	71,0360	71,0980	71,3460	71,3460	71,4730	71,4730	71,4730

Результаты моделирования показали эффективность предложенных математических моделей и алгоритмов идентификации и локализации утечек в газотранспортной системе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен обзор и анализ существующих подходов к идентификации причин и источников небаланса природного газа в трубопроводной газотранспортной системе.

2. Обоснована необходимость и важность процедуры согласования данных при сведении материальных балансов потоков газотранспортной системы и точной оценки причин и источников небаланса природного газа.

3. Сформулированы задачи трубопроводной транспортировки природного газа, идентификации причин и источников небаланса.

4. Разработаны алгоритмы: имитационного моделирования газовых сетей; идентификации причин и источников небаланса транспортируемого газа.

5. Разработаны алгоритмы и программный комплекс статистической оценки грубых ошибок и их корректировки при сведении материальных балансов по потокам газотранспортной системы.

6. Разработаны алгоритм и программа обнаружения утечек методом фильтра частиц в трубопроводах транспортировки природного газа и нефтепродуктов.

7. Представлены результаты моделирования участка газопровода ТГТС ООО «Газпром трансгаз Волгоград».

8. Разработана интеллектуальная система управления сетями газопроводов.

В диссертации представлено применение фильтра частиц для обнаружения утечек в трубопроводах. Результаты моделирования показывают, что фильтр частиц хорошо отражает динамику реальной системы и может служить в качестве программного обеспечения - «мягкого» («виртуального») датчика реальной системы.

Предложенная система может эффективно обнаруживать утечки. Хотя локализация утечки еще не является точной, она может, по крайней мере, изолировать минимально возможный участок трубопровода, в котором предположительно имеется утечка. В настоящее время ведется работа над повышением точности локализации утечки и над тем, чтобы сделать этот метод пригодным даже для небольших утечек, составляющих всего один процент от номинального массового расхода.

Более сложная модель, а также уравнение сохранения энергии будут также использоваться для более точной оценки динамики реального трубопровода, что всегда является сложной задачей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

1. Aleksanyan, D. A. Infocommunication System Weakly Formalized Processes Intelligent Control Based on Fuzzy Logic / D. A. Aleksanyan, M. V. Yashina, A. V. Kostandyan // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2018, Minsk, 04–05 июля 2018 года. – Minsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. – P. 8456982 (**Scopus**).
2. Горбунов, С. С. Построение системы идентификации источников и причин небаланса газа в газотранспортной системе / С. С. Горбунов, А. В. Костандян, В. А. Дубинин, В. А. Костандян // Газовая промышленность. – 2019. – № S2(786). – С. 68-76. (**ВАК**)
3. Костандян, А. В. Имитационная модель идентификации причин и источников дебаланса природного газа в трубопроводной газотранспортной системе / А. В. Костандян, С. С. Горбунов, А. Ф. Егоров, В. В. Сидоров // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2022. – № 3(584). – С. 37-48. (**ВАК**)
4. Горбунов, С. С. Идентификация утечек на подземных и наземных трубопроводах методом максимального правдоподобия / С. С. Горбунов, А. В. Костандян, В. В. Сидоров, А. Ф. Егоров // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2023. – № 4(597). – С. 46-53. (**ВАК**)
5. Костандян А. В., Горбунов С. С., Алексанян Д. А., Егоров А. Ф., Сидоров В. В. Обнаружение утечек в трубопроводах методом фильтра частиц. Автоматизация и информатизация ТЭК. 2024. № 6(611). С. 46 – 58. (**ВАК**)
6. Алексанян, Д. А. Инфокоммуникационная система интеллектуального управления слабоформализуемыми технологическими процессами на базе нечеткой логики / Д. А. Алексанян, А. В. Костандян, М. В. Яшина // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 9-14.
7. Горбунов, С. С. Управление смешением бензинов в условиях параметрической неопределенности / С. С. Горбунов, А. В. Костандян, А. Ф. Егоров, В. В. Сидоров // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 2. – С. 11-14
8. Костандян, А. В. Интеллектуальная система мониторинга измерений в системах управления технологическими процессами / А. В. Костандян, С. С. Горбунов, А. Ф. Егоров, В. В. Сидоров // XXXV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-35» (Ярославль, 30 мая – 03 июня 2022 г.). – Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 1. – С. 21-25.
9. Костандян, А. В. Мониторинг измерений в интеллектуальных системах управления технологическими процессами / А. В. Костандян, С. С. Горбунов, А. Ф. Егоров [и др.] // Информатизация инженерного образования: Материалы VI Международной научно-практической конференции, Москва, 12–15 апреля 2022 года. – Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2022. – С. 41-45.

10. Горбунов, С. С. Система управления смешением бензинов в режиме реального времени в условиях параметрической неопределенности / С. С. Горбунов, А. В. Костандян, А. Ф. Егоров [и др.] // Информатизация инженерного образования: Материалы VI Международной научно-практической конференции, Москва, 12–15 апреля 2022 года. – Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2022. – С. 36-40.

11. Костандян, А. В. Идентификация утечек в трубопроводах природного газа методом фильтра частиц / А. В. Костандян, С. С. Горбунов, Д. А. Алексанян // Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России: Тезисы докладов VII Региональной научно-технической конференции, посвященной 100-летию В.Л. Березина, Москва, 19–21 сентября 2023 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2023. – С. 314.

12. Костандян, А. В. Идентификация и локализация утечек в трубопроводах методом фильтра частиц / А. В. Костандян, А. Ф. Егоров, В. В. Сидоров // Научный форум: технические и физико-математические науки: сборник статей по материалам LXX международной научно-практической конференции, Москва, 05 февраля 2024 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Международный центр науки и образования», 2024. – С. 4-13.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023689075 Российская Федерация. Программный комплекс обнаружения утечки в трубопроводах транспортировки нефтепродуктов и природного газа: № 2023683443 : заявл. 07.11.2023 : опубл. 26.12.2023 / А. В. Костандян, С. С. Горбунов, Д. А. Алексанян [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «КСИМАТИК», Общество с ограниченной ответственностью «МЦЭ-Инжиниринг».