

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ
им. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



Брокарев Иван Андреевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА
КАЧЕСТВА ГАЗА**

Специальность 2.3.8. — «Информатика и информационные процессы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук

Научный руководитель: **Фархадов Маис Паша оглы,**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией «Эргатических систем», Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук.

Официальные оппоненты: **Зыков Сергей Викторович,**
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник департамента бизнес-информатики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

Клименко Анна Борисовна,
кандидат технических наук, доцент кафедры фундаментальной и прикладной математики, Российский государственный гуманитарный университет.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Защита состоится 24 июня 2024 года в 11.00 на заседании диссертационного совета 24.1.107.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук по адресу: Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПУ РАН и на сайте www.ipu.ru.

Автореферат разослан “__” _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.107.03

доктор технических наук, доцент



Барабанова Е. А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Для решения проблемы точного анализа качества природного газа в настоящее время в промышленности используются различные автоматизированные информационные системы (АИС), основанные преимущественно на физико-химических методах анализа. Следует отметить, что при применении таких АИС обеспечивается требуемая точность анализа за счёт использования прямых методов измерения и соответствующих методов обработки информации. Но, при этом, такие системы имеют следующие недостатки: значительные временные и экономические затраты на проведение анализа, высокая трудоёмкость разработки системы и высокие затраты на обслуживание ее технических средств. Соответственно, разработка нового метода и средств обработки информации, а также реализующих их АИС, позволяющих обеспечить высокую скорость проведения анализа качества природного газа, характеризующихся низкой стоимостью разработки и эксплуатации является актуальной задачей.

В настоящее время в нефтегазовой промышленности широко используются нейронные сети в связи с модернизацией отрасли, а также со сложностью решения промышленных задач существующими методами и алгоритмами. Подход с использованием нейросетевых моделей, включая обучение моделей на экспериментальных данных для определения требуемых эксплуатационных и стоимостных показателей, применяется в большом числе практических аспектов нефтегазовой отрасли, таких как контроль давления в газораспределительной сети, прогнозирование вязкости природного газа и т.д. Актуальным является применение нейросетевых технологий и при разработке нового метода и средств обработки информации для интеллектуального анализа качества природного газа.

Среди исследований, посвященных проблемам создания и разработки способов анализа качества природного газа и соответствующих методов обработки информации, необходимо особо отметить работы следующих отечественных и зарубежных ученых: Е.Н. Гапона, Ф.М. Шемякина, В.В. Бражникова, Н.Г. Ярославского, В.М. Чулановского, Н.И. Коротеева, Ю.А. Пентина, В.Р. Полищук, В.Н. Петрова, В.П. Колесова, Т.Т. Котурбаша, В.Г. Кучерова, Н. Dörr, С. Rahmouni, М. Tazerout, О. Le Corre, Н. McNair, J.M. Miller, А. Voersma, К. Altfeld, Р. Schley, М. Jaeschke, К. Loubar, R.R. Thurston. Следует отметить, что несмотря на высокое практическое и теоретическое значение существующих научных разработок для развития нефтегазовой отрасли, в настоящее время недостаточно широко применяются работы по использованию современных методов и средств обработки информации с использованием нейросетевых технологий для анализа качества природного газа. Данные методы позволят существенно снизить временные и стоимостные затраты при проектировании и эксплуатации целого ряда специализированных АИС и ее технических средств. Поэтому разработка математического и программного обеспечения информационной системы интеллектуального анализа качества газа определяет актуальность и востребованность диссертационного исследования.

Объектом исследования являются информационные процессы в автоматизированных информационных системах, применяемых для анализа качества природного газа.

Предметом исследования являются метод, модели, алгоритмические и программные средства обработки информации для интеллектуального анализа качества природного газа.

Целью диссертационной работы является разработка метода обработки информации с применением нейросетевых технологий, а также архитектуры АИС для повышения эффективности анализа качества природного газа путем снижения временных и стоимостных затрат.

В диссертационной работе решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ существующих моделей, алгоритмов и информационных систем, используемых для анализа качества природного газа.

2. Разработан метод обработки информации с использованием нейросетевых технологий для определения качества природного газа на основе массива данных о входных физических параметрах.

3. Разработан алгоритм перехода от исходного природного газа к модели эквивалентного псевдогаза.

4. Разработана методика и математические модели для оценки точности интеллектуального анализа качества газа.

5. Разработана архитектура АИС определения характеристик природного газа, реализующая предлагаемый метод обработки информации.

6. Проведена оценка эффективности применения разработанного математического и программного обеспечения.

Область исследования. Диссертационная работа соответствует содержанию специальности 2.3.8. «Информатика и информационные процессы», а именно следующим пунктам паспорта специальности:

1. Разработка методов обработки, группировки и аннотирования информации, в том числе, извлеченной из сети интернет, для систем поддержки принятия решений, интеллектуального поиска, анализа.

2. Разработка компьютерных методов и моделей описания, оценки и оптимизации информационных процессов и ресурсов, а также средств анализа и выявления закономерностей на основе обмена информацией пользователями и возможностей используемого программно-аппаратного обеспечения.

3. Автоматизированные информационные системы, ресурсы и технологии по областям применения (научные, технические, экономические, образовательные, гуманитарные сферы деятельности), форматам обрабатываемой, хранимой информации. Системы принятия групповых решений, системы проектирования объектов и процессов, экспертные системы и др.

4. Обеспечение информационных систем и процессов, применения информационных технологий и систем в принятии решений на различных уровнях управления. Общие принципы и основы организации информационных служб и электронных библиотек.

Методы исследования. В диссертационной работе применяются методы машинного обучения, компьютерное имитационное моделирование, используются регрессионный и корреляционный анализ, методы многокритериальной оценки формирования нейросетей. При реализации разработанных метода и средств обработки информации используются среда Matlab и специализированное программное обеспечение NIST REFPROP¹.

Научная новизна работы:

1. Разработан метод обработки информации об измеряемых физико-химических параметрах газа, отличающийся применением нейросетевых технологий и регрессионных моделей и позволяющий проводить интеллектуальный анализ качества газа с меньшими временными и стоимостными затратами.

2. Разработан модифицированный алгоритм описания, оценки информационных параметров реального газа и перехода к модели эквивалентного псевдогаза, отличающийся возможностью обработки информации о широком классе объектов и выбора числа компонент и моделей псевдогаза на основе возможностей используемого программно-аппаратного обеспечения.

3. Разработана методика и математические модели, позволяющие проводить многоэтапную оценку показателей точности информационных параметров АИС и повышающие эффективность ее функционирования, обеспечивающие применение информационных технологий в принятии решения о качестве газа на оперативном уровне управления.

4. Разработана архитектура АИС для интеллектуального анализа качества природного газа, отличающаяся отсутствием сложных информационных процессов, необходимых для получения результатов прямых физико-химических методов измерения, реализующая алгоритм перехода от реального газа к псевдогазу и нейросетевой анализ информации, что позволяет уменьшить число необходимых входных информационных параметров, повысить скорость обработки информации и уменьшить стоимость проведения анализа.

Теоретическая и практическая значимость работы. Значение полученных результатов для теории информации и информационных процессов состоит в развитии методов, моделей и алгоритмов, используемых в АИС для решения задач, связанных с анализом качества газа. Практическая значимость работы заключается в разработке программного обеспечения, реализующего предлагаемый метод обработки информации для повышения эффективности анализа качества природного газа.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод обработки информации об измеряемых физико-химических параметрах газа, позволяющий проводить анализ качества газа в 10^3 раз быстрее и в 10 раз дешевле по сравнению с существующими методами анализа при удовлетворении требованиям по его точности.

2. Модифицированный алгоритм описания, оценки информационных параметров реального газа и перехода к модели эквивалентного псевдогаза.

¹ <https://www.nist.gov/srd/refprop>

3. Методика и математические модели, позволяющие проводить многоэтапную оценку показателей точности информационных параметров разработанной АИС и повышающие эффективность ее функционирования.

4. Архитектура АИС определения показателей качества природного газа с обеспечением требуемых временных и стоимостных затрат.

Степень обоснованности и достоверности полученных результатов. Достоверность выводов диссертационной работы подтверждается результатами экспериментальных исследований. Выполнена проверка результатов диссертационной работы путем исследования точности анализа. Разработанные модели, алгоритм и метод обработки информации прошли апробацию на многочисленных международных конференциях и при публикации в высокорейтинговых международных изданиях.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: семинарах ИПУ РАН и 12 всероссийских и международных конференциях: XII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России», 73-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2019», 18-я Международная научно-практическая конференция им. А. Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование», XXII Международная конференция «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (DCCN 2019), 13-я Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика)», The 2nd International Workshop on Stochastic Modeling and Applied Research of Technology, XXIII Международная конференция «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь», The 5th International Conference on Stochastic Methods, 19-я Международная научно-практическая конференция им. А. Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование», 6th International Reliability and Safety Engineering Conference, The 15th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies, 6th International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies, 5th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 24 научных трудах, в том числе: в 8 статьях в журналах, индексируемых Scopus/WoS, в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России, из них 5 входят в список RSCI, в 9 тезисах и материалах международных и всероссийских конференций. Зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

Личный вклад соискателя. Все исследования, изложенные в диссертационной работе, выполнены лично соискателем в процессе научной деятельности. Во всех работах и публикациях, выполненных в соавторстве, автор внес значительный вклад в разработку представленных методов, моделей и алгоритмов, а также в проведение экспериментальных исследований.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 134 наименований и 4 приложений. Полный объем диссертации составляет 181 страница, включая 54 рисунка и 35 таблиц.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, определяются цели и задачи диссертации, рассмотрена научная новизна диссертации, представлены положения, выносимые на защиту, приведены основные результаты апробации исследования, представлены структура работы и публикации.

В первой главе проведен подробный обзор и исследованы наиболее известные методы обработки информации и подходы к реализации АИС, используемых для анализа показателей качества природного газа. В результате проведенного анализа сделан вывод о том, что газоаналитическая техника основных мировых лидеров по их производству, таких как BW Technologies, Dräger, MSA Auer, Testo, а также лидера отечественного рынка, ФГУП СПО «Аналитприбор», использует преимущественно физико-химические средства анализа и соответствующие им методы обработки информации. В качестве примера АИС в диссертации приводится централизованная система контроля и анализа газа ACM 150 FT-IR, применяемая для детектирования токсичных компонентов в ходе производственного процесса. Преимуществами данной системы являются большое количество точек контроля, двойное инфракрасное сканирование, уменьшающее количество ложных срабатываний, наличие самодиагностики, которая исключает необходимость калибровки на месте, удобный сенсорный интерфейс. Однако данные преимущества в свою очередь определяют и недостатки таких систем - большие временные и стоимостные затраты на проведение анализа и высокая стоимость технических средств АИС для проведения анализа и обработки информации. Методы обработки информации на основе нейросетевых технологий лишены указанных недостатков. Поэтому считается перспективной разработка АИС, в функционирование которых встроены методы и технологии искусственного интеллекта. В связи с тем, что в настоящее время для решения различных производственных задач применяются как методы регрессионного анализа, так и нейросетевые технологии, важной задачей является проведение сравнительного анализа данных моделей и выбор наиболее эффективной для достижения поставленной в работе цели.

Таким образом, в основе существующих АИС определения показателей качества природного газа лежат физико-химические методы анализа, недостатком которых является высокая стоимость и длительное время анализа. Поэтому представляется целесообразной разработка АИС, в основе которой лежат новые методы обработки информации с применением нейросетевых технологий, позволяющие определять показатели качества природного газа по меньшему числу информационных параметров, что существенно упрощает процесс анализа и позволяет создавать измерительные комплексы с меньшей стоимостью, габаритами и временными затратами, чем существующее в настоящее время.

Во второй главе разработан и исследован метод обработки информации для интеллектуального анализа качества газа, основанный на использовании

нейросетевых технологий и реализации алгоритма перехода от реального газа к псевдогазу. Основной принцип интеллектуального анализа качества газа состоит в определении компонентного состава модели эквивалентного псевдогаза. Метод основан на использовании статистических и корреляционных зависимостей между физическими параметрами и концентрациями компонентов, входящих в исследуемый объект.

Разработанный метод предполагает обработку информации на следующих двух этапах. На первом этапе с помощью специально разработанной нейросетевой модели определяются информационные параметры модели эквивалентного псевдогаза. На втором этапе - по определенным на предыдущем этапе информационным параметрам псевдогаза, значения которых определяют его компонентный состав, рассчитываются требуемые информационные параметры реального газа, определяющие значения его энергетических характеристик. Блок-схема разработанного метода обработки информации приведена на рисунке 1. На рисунке E_1 , E_2 – погрешности модели, E_{1max} , E_{2max} – максимальные допустимые погрешности модели, Δ – общая погрешность проведения анализа, Δ_{max} – максимальная допустимая погрешность проведения анализа.

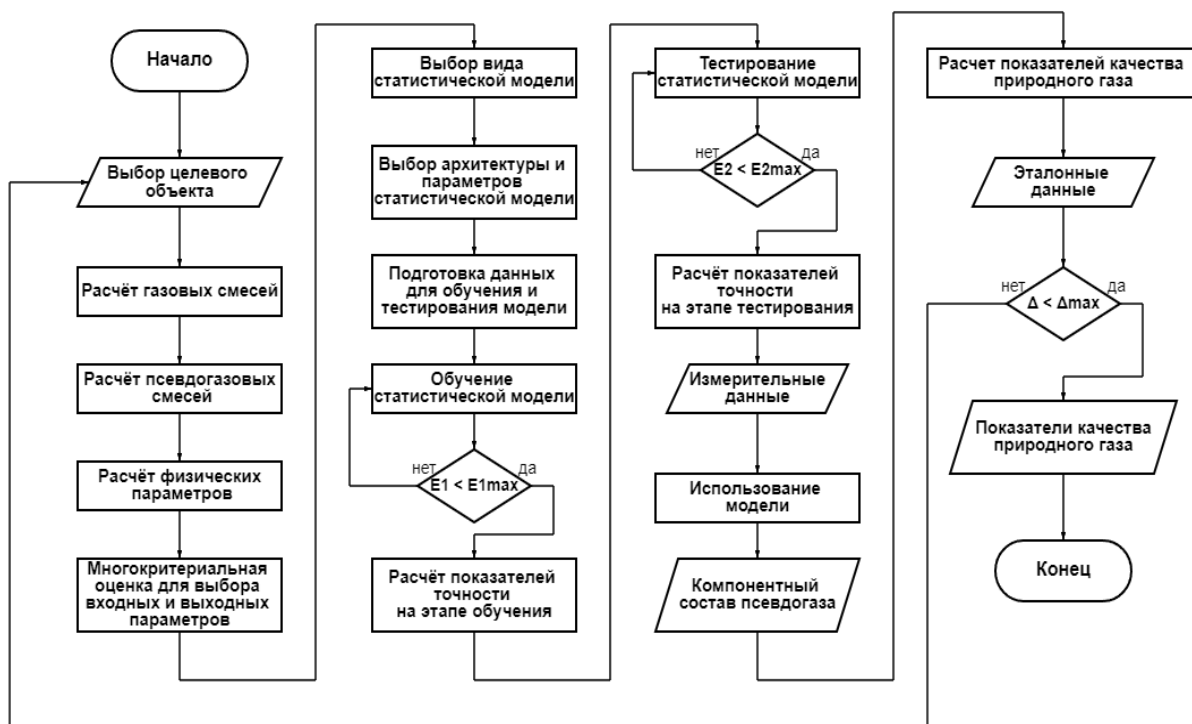


Рисунок 1 – Последовательность этапов метода обработки информации для интеллектуального анализа показателей качества газа.

Первый этап предлагаемого метода обработки информации состоит из следующих подэтапов:

1. *Имитационное моделирование исходных газовых смесей и информационных параметров, определяющих их компонентный состав.* На начальном этапе производится обоснование выбора объекта исследования, к которому будет применяться предлагаемый метод. Согласно действующим

российским и международным стандартам моделируются газовые смеси путем расчёта их компонентного состава.

2. *Применение алгоритма перехода от рассматриваемой газовой смеси к модели эквивалентной псевдогазовой смеси.* Существуют алгоритмы перехода от природного газа к модели эквивалентного псевдогаза с меньшим количеством компонентов и соответствующих информационных параметров, но со свойствами, которые соответствуют свойствам изначального природного газа. Согласно алгоритмам и формулам, предложенным в работах К. Loubar, R. Thurston, K. Rahmouni, M. Tazerout, O. Le Corre, природный газ может быть описан эквивалентным псевдогазом с информационными параметрами, характерными для составляющих его углеводородных компонентов (эффективных метана, этана и пропана), эффективного азота и эффективного диоксида углерода.

Ниже приведены системы уравнений, позволяющие преобразовать информационные параметры состава природного газа в информационные параметры модели четырёх (1) и пятикомпонентного (2) псевдогаза, состоящего из эффективных метана, пропана, азота, диоксида углерода, а также этана в случае пятикомпонентного псевдогаза. Формулы получены исходя из результатов проведенного имитационного моделирования различных газовых и псевдогазовых смесей.

$$\left\{ \begin{array}{l} x'_1 = C_{11}(P, T) * x_1 + C_{12}(P, T) * x_2 - C_{13}(P, T) * x_4 - C_{14}(P, T) * x_5 - C_{15}(P, T) * x_6 \\ x'_2 = C_{21}(P, T) * x_2 + C_{22}(P, T) * x_3 + C_{23}(P, T) * x_4 + C_{24}(P, T) * x_5 + C_{25}(P, T) * x_6 \\ x'_3 = x_7 \\ x'_4 = x_8 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x'_1 = C_{11}(P, T) * x_1 - C_{12}(P, T) * x_4 - C_{13}(P, T) * x_5 - C_{14}(P, T) * x_6 \\ x'_2 = C_{21}(P, T) * x_2 + C_{22}(P, T) * x_4 + C_{23}(P, T) * x_5 - C_{24}(P, T) * x_6 \\ x'_3 = C_{31}(P, T) * x_3 + C_{32}(P, T) * x_4 + C_{33}(P, T) * x_5 + C_{34}(P, T) * x_6 \\ x'_4 = x_7 \\ x'_5 = x_8 \end{array} \right. \quad (2)$$

где x_i и x'_i – информационные параметры (молярные доли) i -тых компонентов природного газа и псевдогаза, $C_{ij}(P, T)$ – коэффициенты перехода к модели псевдогаза, зависящие от температуры и давления.

Входной информацией для алгоритма является количество доступных технических средств АИС, каждое из которых предназначено для получения входных информационных параметров исследуемого объекта и количество требуемых информационных параметров, определяющих компонентный состав объекта исследования. Выходной информацией в алгоритме являются информационные параметры, определяющие компонентный состав выбранной модели псевдогаза.

Для рассматриваемого объекта показатели точности определения его информационных параметров при переходе к четырёхкомпонентному псевдогазу оказались выше, чем у пятикомпонентного. В связи с этим, в диссертации был

исследован переход от природного газа к четырехкомпонентному псевдогазу. Алгоритм перехода к эквивалентному псевдогазу был подтвержден на результатах проведенных экспериментов. После обработки результатов эксперимента для всех исследованных смесей максимальное относительное отклонение по скорости звука составило не больше 0.21% и по теплопроводности не более 1.05%. Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод об эффективности алгоритма перехода к модели псевдогаза и корректности его применения в рамках разработанного метода.

3. *Моделирование информационных параметров для исходных газовых смесей и эквивалентных им псевдогазовых смесей.* В программном комплексе NIST REFPROP рассчитываются требуемые информационные параметры, определяющие физические характеристики газа и энергетические характеристики как для исходных газовых, так и для эквивалентных им псевдогазовых смесей.

4. *Обоснование выбора измеряемых (входных) информационных параметров (физических характеристик) и выходных параметров.*

Для определения взаимосвязи параметров и компонентного состава природного газа проводился корреляционный анализ физических параметров и компонентного состава выборки природного газа различного компонентного состава. По рассчитанным коэффициентам корреляции Пирсона для смоделированной выборки делался вывод о целесообразности выбора входного параметра. В результате проведенной многокритериальной оценки с применением метода анализа иерархий в качестве входных величин для модели были выбраны следующие информационные параметры: скорость звука, теплопроводность и концентрация диоксида углерода. Результаты проведенной многокритериальной оценки входных информационных параметров подтверждаются результатами нейросетевого анализа, проведенного на различных наборах входных информационных параметров. Проведение нейросетевого анализа на нескольких этапах метода является его преимуществом. Также преимуществом и новизной предлагаемого подхода является определение большего числа информационных параметров по сравнению с существующими системами.

5. *Разработка статистической модели для определения компонентного состава природного газа по измеряемым физическим параметрам.* Данный этап включает в себя ряд последовательных задач, которые были решены для разработки необходимой модели.

5.1. *Выбор вида статистической модели.* На этом этапе производился сравнительный анализ различных статистических моделей (многопараметрическая линейная регрессия, гребневая регрессия, нейросетевая модель). В результате сравнительного анализа в качестве основной статистической модели для решения поставленной задачи была выбрана нейросетевая модель. Сравнительный анализ на данном и всех последующих этапах заключался в обучении и тестировании различных моделей в единообразных условиях. Затем выбиралась модель с наилучшими показателями точности среди всех исследованных. Стоит отметить, что преимуществом разработанного метода анализа качества газа является его многофункциональность и возможность выбора статистической модели под каждый определенный объект.

5.2. Выбор вида нейросетевой модели. На данном этапе рассматривались различные нейросетевые модели (нейросетевая модель в виде многослойного персептрона, простая рекуррентная нейросетевая модель, рекуррентная нейронная сеть с долгой краткосрочной памятью, рекуррентная нейронная сеть с управляемым рекуррентным блоком). В результате анализа в качестве нейросетевой модели для решения поставленной задачи была выбрана простая рекуррентная нейронная сеть. Выбор осуществлялся исходя из показателей точности на этапах обучения и тестирования модели на данных, полученных в результате имитационного моделирования.

5.3. Выбор параметров модели (Блок “Выбор параметров статистической модели”). На данном этапе рассматривались нейросетевые модели с различным значением внутренних параметров, таких как вид функции активации скрытого слоя и выходного слоя, количество нейронов в скрытом слое. В результате сравнительного анализа исходя из показателей точности была выбрана модель с одним скрытым слоем со следующими параметрами: 3 нейрона во входном слое, 11 нейронов в скрытом слое, 3 нейрона в выходном слое, сигмоидальная функция активации в виде гиперболического тангенса в скрытом слое, линейная функция активации в выходном слое.

5.4. Обучение модели. Данный этап заключается в обучении разработанной нейросетевой модели на подготовленной тренировочной выборке данных.

5.4.1. Выбор алгоритма обучения. В качестве обучающего алгоритма выбран алгоритм Левенберга–Марквардта. Алгоритм применялся на большой выборке газовых смесей для обеспечения высоких показателей обучения. Результирующая выборка составила около миллиона возможных смесей природного газа. Данная выборка строилась на основе российского нормативного документа ГОСТ 31371.3, регламентирующего компонентный состав природного газа.

5.4.2. Выбор критериев окончания обучения. Критериями для окончания обучения являлись минимальное значение отклонения, то есть минимальная сумма квадратичных отклонений выходов сети от истинных значений, при которой обучение будет считаться законченным.

5.5. Оценка точности работы разработанной нейросетевой модели. Для оценки точности работы нейросетевой модели рассчитывались следующие показатели точности: максимальное абсолютное отклонение, среднее абсолютное отклонение, максимальное относительное отклонение, среднее относительное отклонение, среднеквадратическое отклонение, коэффициент детерминации. По этим характеристикам определения концентрации каждого компонента псевдогазовой смеси делался вывод о применимости разработанной модели или необходимости переобучения модели.

5.6. Тестирование разработанной нейросетевой модели. Данный этап заключался в финальном тестировании разработанной нейросетевой модели на подготовленной тестовой выборке данных. Выборка составила около 4000 газовых смесей на основе российского природного газа.

5.6.1. Формирование тестовой выборки газовых смесей для нейросетевой модели (Блок “Подготовка данных для обучения и тестирования модели”). Тестовая выборка формировалась по тем же принципам, что и тренировочная

выборка, но включала данные, которые не участвовали на этапе обучения нейросетевой модели.

5.6.2. Оценка точности работы модели на тестовой выборке. Оценка точности проводилась тем же способом, что и на этапе обучения модели.

Второй этап предлагаемого метода обработки информации состоит из следующих задач:

1. *Определение информационных параметров псевдогаза, определяющих его компонентный состав, описанное выше.*

2. *Расчет требуемых энергетических параметров газа на основе его информационных параметров, определенных на предыдущем этапе.*

3. *Проверка соответствия энергетических параметров эталонным данным.* В качестве таких данных выступают данные, полученные в результате хроматографического анализа.

Проведенное экспериментальное исследование показало, что точность определения показателей качества природного газа удовлетворяет поставленным в диссертации задачам.

В третьей главе разработаны методика и математические модели для проведения многоэтапной оценки точности информационных параметров для повышения достоверности результатов интеллектуального анализа качества природного газа. Оценка показателей надежности технических средств АИС и точности результатов информационных процессов, реализуемых в информационных системах анализа при определении компонентного состава и энергетических характеристик газа, является важной задачей.

Недостаточная надежность функционирования АИС приводит к наличию неточностей в оценке основных параметров исследуемого объекта информационной системы и, следовательно, к существенным стоимостным затратам. Для рассматриваемой архитектуры АИС была разработана методика (рисунок 2), основанная на оценке показателей точности информации в ходе ее обработки на нескольких этапах, в частности на этапах перехода к информационным параметрам модели эквивалентного псевдогаза, этапе разработки статистической модели, а также при оценке входных информационных параметров за счет разности показаний измерительных приборов основного и резервного измерительного канала. Заключительным действием предлагаемой методики является результирующая оценка АИС по критериям отказа системы.

Сущность метода оценки точности по отклонению показаний основного и резервного измерительных приборов (ИП) проиллюстрирована на рисунке 4. Измерение для i -ого информационного параметра газа считается точным, если разница между значениями, полученными с основного и резервного измерительного прибора, лежит в некотором, заранее выбранном диапазоне $(-\varepsilon_i, \varepsilon_i)$, $\varepsilon_i > 0$ – граница диапазона для i -ого параметра. Под отказом системы понимается выход показателя точности за допустимые границы.

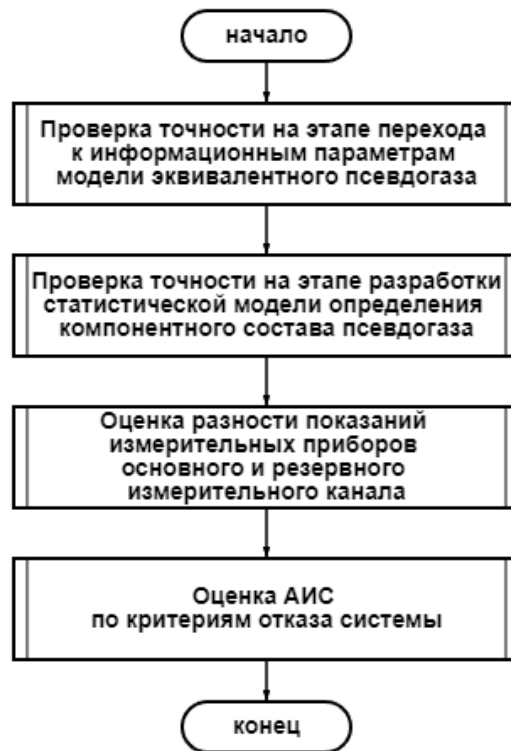


Рисунок 2 – Методика многоэтапной оценки точности информационных параметров АИС.

При этом считается, что измерительный прибор, предназначенный для определения значения соответствующего информационного параметра АИС, вышел из строя, если на выходе канала фиксируется недопустимая разница в показаниях основного и резервного прибора. В этой ситуации фиксируется отказ программно-технических средств соответствующей подсистемы АИС. Оценка разницы показаний основного и резервного приборов вычисляется согласно (3).

$$\left| Y_{1i}^{(j)} - Y_{2i}^{(j)} \right| = \xi_i^{(j)}, \quad (3)$$

где $Y_{1i}^{(j)}$ – i -ое измерение основного j -ого ИП, $Y_{2i}^{(j)}$ – i -ое измерение резервного j -ого ИП, $\xi_i^{(j)}$ – значение отклонения для i -го измерения j -ого ИП, $j = 1 \dots N$ - количество информационных параметров.

В работе предложено несколько критериев для оценки надежности функционирования АИС при анализе входных информационных параметров: критерий, при котором отказом системы считается снижение показателей точности до заданного порога для всех информационных параметров; критерий, при котором отказом системы считается снижение показателей точности хотя бы для одного информационного параметра; критерий, при котором отказом системы считается снижение показателей точности для нескольких из рассматриваемых информационных параметров.

Выражения (4) – (6) представляют собой математические модели для расчета показателей надежности подсистемы программно-технических средств, таких как функция распределения времени работы $F_2(t)$, функция надёжности $R_2(t)$ и средняя

наработка на отказ $MTTF_2$ для критерия, при котором снижение показателей точности хотя бы для одного параметра считается отказом, находятся по приведенным ниже формулам. Модели (4-6) получены на основании решения дифференциального стохастического уравнения, описывающего модель работы системы.

$$F_2(t) = \prod_{i=1}^n (1 - \Phi(\frac{A_i - \mu_i t}{\sigma \sqrt{t}}) + e^{\frac{-2\mu_i A_i}{\sigma^2}} \Phi(\frac{-A_i - \mu_i t}{\sigma \sqrt{t}})), \quad (4)$$

$$R_2(t) = 1 - F_2(t), \quad (5)$$

$$MTTF_2 = \int_0^{\infty} R_2(t) dt, \quad (6)$$

где Φ – функция распределения для стандартного нормального закона, n – количество исследуемых параметров, A_i – пороговые значения для технических средств информационной системы, μ_i , σ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение показаний i -ого измерительного прибора.

Была проведена качественная оценка разработанной АИС и ее существующих аналогов (таблица 1). Быстродействие разработанной АИС определялось экспериментальным путем, исходя из времени на опрос измерительных приборов и времени обработки полученной информации, и составило несколько секунд. Значение точности определения информационных параметров АИС получено на основе экспериментальных данных и методики определения на их основе энергетических параметров газа (таблица 2). Стоимость разработанной АИС определялась исходя из стоимости разработанного программного обеспечения, необходимых технических средств и отсутствием затрат на проведение прямых измерений. При сравнении надежности функционирования разработанной и существующих АИС для предложенной АИС использовалась модель (6), а для существующих – средние показатели, указанные в технических характеристиках.

Таблица 1 - Сравнение автоматизированных информационных систем

Критерий сравнения	Порядок времени проведения анализа, сек.	Точность, МДж/м ³	Порядок стоимости, тыс. руб.	Средняя наработка на отказ технических средств, ч
Разработанная АИС	10 ⁰	≈±0.5	10 ²	≈2.6*10 ⁴
Существующие АИС	10 ³	±(0.1-0.2)	10 ³	≈10 ⁴

Исследование критериев отказа системы показало снижение точности оценок в зависимости от количества параметров, входящих в модель. Разработанные методика и математические модели для оценки точности информационных

параметров АИС позволяют проводить интеллектуальный анализ качества газа с более высокой достоверностью.

В четвертой главе экспериментально подтверждаются полученные в предыдущих главах диссертации научные результаты с помощью реализованной АИС анализа качества газа. Архитектура разработанной АИС показана на рисунке 3 и состоит из трех основных компонентов: подсистема алгоритмов, которая включает подготовку данных, выбор входных параметров для статистической модели, выбор вида модели; подсистему получения измерительной информации, включая измерение физических параметров газа и получение информации от эталонного анализатора; подсистему проведения расчёта требуемых информационных параметров, которая осуществляет обработку измерительной информации и финальный расчет энергетических параметров с последующим сравнением с эталонными данными.

Экспериментальные исследования заключались в подготовке реальных газовых смесей с помощью газосмесительной станции и измерении физических параметров смесей. Из полученных входных информационных параметров формировалась выборка, на которой тестировалась разработанная нейросетевая модель. В подсистеме получения измерительной информации осуществляется подготовка газовой смеси путем смешения компонентов с задаваемой концентрацией. Полученная смесь поступает в измерительную камеру с установленным в ней блоком измерительных приборов, затем происходит анализ смеси с использованием газового хроматографа, полученные измерительные данные поступают на персональный компьютер (ПК). Скорость звука измерялась специализированным измерительным прибором, принцип действия которого основан на измерении времени прохождения звукового импульса через исследуемую газовую смесь с помощью пары ультразвуковых преобразователей (излучающего и принимающего). Теплопроводность, которая может быть характеризована коэффициентом теплопроводности, измерялась прибором, в котором реализован принцип, основанный на измерении коэффициента теплопроводности между мембраной и окружающей газовой средой. Для измерения концентрации диоксида углерода использовался недиспергирующий инфракрасный измерительный прибор, который позволяет измерять поглощение инфракрасного излучения.

Подсистема алгоритмов включает алгоритмы обработки и визуализации данных. В предлагаемой реализации архитектуры системы в качестве программного обеспечения используется пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений Matlab с плагином NIST REFPROP. В качестве пакета прикладных программ для реализации алгоритмов обработки и визуализации данных и расчёта параметров газа в исследуемой задаче возможно использовать любое программное обеспечение, функционирующее на современных операционных системах, что является преимуществом предлагаемой системы - свойством многофункциональности системы. Подсистема алгоритмов включает в себя следующие алгоритмы: алгоритмы формирования расчётных данных, алгоритмы проведения нейросетевого анализа, алгоритмы первичной

визуализации данных. Нейросетевой анализ проводился на расчётных данных для получения показателей точности на этапах обучения и тестирования модели.

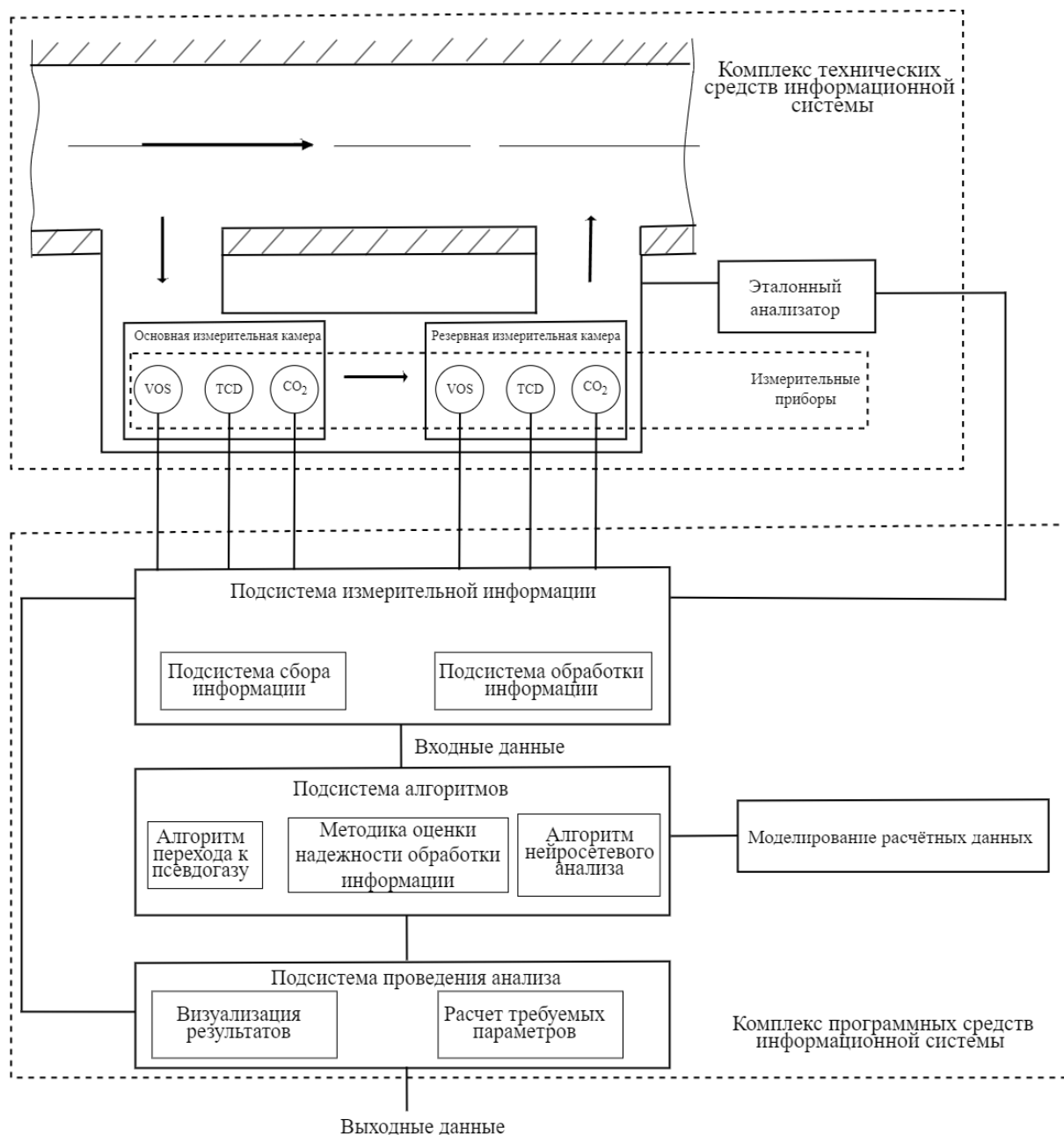


Рисунок 3 – Архитектура АИС.

Подсистема проведения анализа была реализована с использованием того же программного обеспечения, что и подсистема алгоритмов. В данной подсистеме разработанная в подсистеме алгоритмов нейросетевая модель симулировалась на измерительных данных, полученных в соответствующей подсистеме, с последующим сравнением с эталонными данными. После коррекции и обработки измерительных данных разработанная нейросетевая модель тестировалась на полученных экспериментальных данных.

В таблице 2 показаны характеристики определения энергетических параметров газа (низшая объемная теплотворная способность и число Воббе), полученных по экспериментальным данным.

Таблица 2 - Точность определения энергетических параметров газа с использованием разработанной нейросетевой модели

Абсолютная погрешность, МДж/м ³	Теплотворная способность	Число Воббе
Максимальное абсолютное отклонение	0.351	0.478
Среднее абсолютное отклонение	0.112	0.235

На рисунке 4 показан выходной результат АИС для одного из информационных параметров газа (для низшей объемной теплотворной способности).

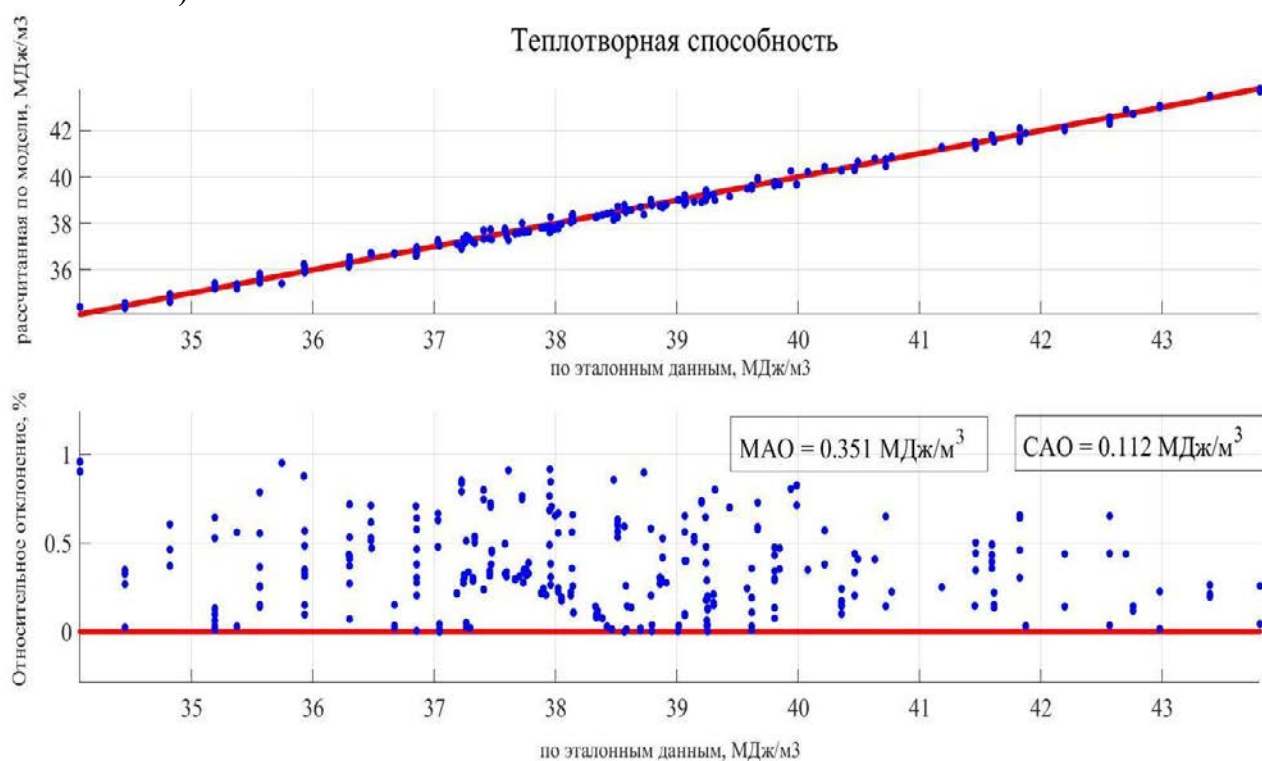


Рисунок 4 - Выходной результат АИС для одного из информационных параметров газа.

Максимальное отклонение определения требуемых параметров меньше, чем $\Delta_{\max} = 0.5 \text{ МДж/м}^3$, что соответствует третьему классу определения энергетических параметров согласно международному стандарту ISO/CEN 2014 EN ISO 15971.

Преимуществом каждой из подсистем разработанной АИС по сравнению с существующими является их многофункциональность, позволяющая модифицировать систему на каждом этапе под определенную задачу анализа, например, анализ товарного газа с целью определения его стоимости, анализ качества газа с целью обеспечения безопасности при его транспортировке и т.д. Разработанная архитектура АИС апробирована на результатах экспериментов,

проведенных в лабораторных условиях. Результаты диссертации использованы компанией ООО «Газпром добыча Ямбург» при проведении работ по исследованию и анализу различных современных подходов к определению качества природного газа; верификации качества функционирования аналитического оборудования и моделированию программных комплексов; проведению экспериментальных исследований для оценки точности определения качества природного газа. Рассчитаны показатели точности определения энергетических параметров, по которым сделан вывод об адекватности применения разработанного метода обработки информации, лежащего в основе предлагаемой АИС для анализа качества реальных газовых смесей.

Выводы

В диссертационной работе была решена актуальная научно-техническая задача по разработке моделей, методов и программных средств обработки информации для повышения эффективности анализа качества газа и получены следующие научные результаты:

1. Проведен анализ существующих моделей, алгоритмов и методов, используемых для анализа качества природного газа, показавший наличие существенных недостатков в существующих методах и информационных системах, применяемых в данной области, что обусловило необходимость разработки нового метода обработки информации и АИС, архитектура которой основана на предлагаемых алгоритмах и моделях.

2. Разработан и исследован метод обработки информации автоматизации интеллектуального анализа показателей качества газа, применение которого позволит повысить скорость анализа в 10^3 раз и уменьшить стоимостные затраты в 10 раз.

3. Разработан и исследован алгоритм перехода от информационных параметров исходного природного газа к информационным параметрам модели эквивалентного псевдогаза, позволяющий проводить анализ для широкого класса целевых объектов, в том числе газообразных веществ и псевдогазовых смесей.

4. Разработаны методика и математические модели, позволяющие обеспечить точность обработки информации и повысить эффективность проведения анализа качества газа.

5. Разработана архитектура АИС интеллектуального анализа качества газа для определения параметров природного газа с использованием нейросетевых технологий, отличающаяся от существующих применением разработанного метода обработки информации.

6. Проведена оценка эффективности применения предлагаемого математического и программного обеспечения информационной системы интеллектуального анализа качества газа на основе экспериментальных и расчетных данных, доказывающая повышение скорости анализа в 10^3 раз, снижение затрат на анализ в 10 раз и удовлетворяющая требованиям к точности проведения анализа.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в журналах из перечня Scopus/Web of Science:

1. Brokarev I.A., Vaskovskii S.V. Distributed data gathering system to analyze natural gas composition // *Advances in Systems Science and Applications*. — 2019. — Vol. 19, No. 4. — Pp. 14-24. (K1)
2. Brokarev I.A., Vaskovskii S.V. Multi-criteria estimation of input parameters in natural gas quality analysis // *Advances in Systems Science and Applications*. — 2020. — Vol. 20, No. 4. — Pp. 60-69. (K1)
3. Koturbash, T., Brokarev, I. Estimation of the energy content of propanated biomethane using ultrasonic measurements // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. — 2021. — 86. Pp. 1-9. (K1)
4. Brokarev, I.A., Farkhadov, M.P., Vaskovskii, S.V. Recurrent neural networks to analyze the quality of natural gas // *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta - Upravlenie, Vychislitel'naya Tekhnika i Informatika*. — 2021. — 55. — Pp. 11–17. (K2)
5. Brokarev I.A., Vaskovskii S.V. Investigation of Reliability for Information System for Natural Gas Quality Analysis // *Advances in Systems Science and Applications*. — 2022. — Vol. 22, No. 2. — Pp. 11-20. (K1)
6. Farhadov M., Vaskovskii S., Brokarev I., Ghorbani S., Reza Kashyzadeh K. Quality Analysis of Natural Gas Using the Structural Reliability of an Analytical Information System // *Mathematics*. — 2023. — 11, 3238. (K1)

Статьи, опубликованные в журналах из перечня RSCI, ВАК РФ:

7. Котурбаш Т.Т., Брокарев И.А. Метод определения свойств и состава природного газа по измерениям его физических параметров // *Датчики и системы*. — 2018. — №6. — С. 43-50.
8. Котурбаш Т.Т., Брокарев И.А. Сравнительный анализ физических свойств природного газа и эквивалентных ему псевдогазовых смесей // *Датчики и системы*. — 2019. — №3. — С. 7-13.
9. Брокарев И.А. Искусственные нейронные сети для решения задачи анализа компонентного состава газовых смесей // *Управление большими системами*. — 2019. — Выпуск 80. М.: ИПУ РАН. — С. 98-115.
10. Васьковский С.В., Брокарев И.А. Comparative analysis of statistical models for the task of natural gas composition analysis // *Информационные технологии и вычислительные системы*. — 2020. — № 1. — С. 34-43.
11. Брокарев И.А., Васьковский С.В., Фархадов М.П. Автоматизированная информационная система анализа качества природного газа // *Управление большими системами*. — 2024. — Выпуск 108. М.: ИПУ РАН. — С. 174-191.

Зарегистрированная программа для ЭВМ:

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Модель автоматизированной информационной системы с применением метода обработки информации, основанного на нейросетевых технологиях / С.В. Васьковский, И.А. Брокарев; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. — № 2023661379; заявл. 19.05.23; опубл. 30.05.23, (Российская Федерация).

Научное издание

Брокарев Иван Андреевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА
КАЧЕСТВА ГАЗА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем управления имени

В.А. Трапезникова

Российской академии наук

117997

ул. Профсоюзная, д.65

Россия, Москва

www.ipu.ru