

## ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу Артура Валериевича Костандяна «Автоматизированная система контроля и идентификации источников небаланса газа в газотранспортной системе», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

**Актуальность работы.** Диссертационная работа Костандяна А.В. посвящена одной из важных проблем поддержания сбалансированных режимов транспортировки природного газа, определяющих эффективность функционирования трубопроводной газотранспортной системы (ГТС).

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью совершенствования оперативно диспетчерского управления ГТС.

Управлению режимами газотранспортной системы осуществляется на основе обработки большого объема информации от средств измерений параметров газа и анализа результатов на определенном временном интервале.

Качество системы газоснабжения определяются величиной небаланса природного газа и выступают главными критериями эффективного управления и учета поставляемого газа.

В связи с этим одной из ключевых задач газовой отрасли является дальнейшее повышение эффективности оперативно-диспетчерского системы управления ГТС, построенной на принципах системного единства и совместимости математического и технического обеспечения.

Важную роль приобретают подходы к управлению ГТС, основанные на построении информационных систем идентификации причин и источников небаланса природного газа.

Эффективность системы управления достигается применением математических методов и моделей, алгоритмов идентификации причин и источников небаланса газа для поддержания оперативного принятия решений.

В настоящее время отсутствуют примеры систем технической реализации оперативной идентификации причин и источников небаланса природного газа, обеспечивающих принятие решений для эффективного управления.

Данная проблема актуальна и в настоящее время.

**Анализ основных положений диссертационной работы.** Диссертационная работа включает в себя введение, пять глав, выводы, список используемой литературы. Общий объем диссертации составляет (188) страниц, включающие (48) рисунков, (15) таблиц и одно Приложение. Список цитируемой литературы содержит (179) наименований.

**Во введении** представлено общее состояние проблемы небаланса природного газа в газотранспортных системах, обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели исследования, изложена научная новизна и практическая значимость. Представлены методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности полученных результатов, а также личный вклад автора.

**В первой главе** приведены обзор и анализ научно-технической литературы по теме диссертации, подходы к идентификации причин и источников небаланса

природного газа в газотранспортных системах. Представлены существующие методики расчета и контроля неучтенного газа в газотранспортной системе, основные математические модели для расчетов и анализа режимов работы и оценки возможных причин возникновения небаланса газа. Рассмотрены теоретические методы оценки достоверности измерительной информации при сведении материального баланса и сформулированы задачи диссертационной работы. Представлено обоснование важности и необходимости процедуры согласования данных при оптимизации управления газотранспортной системой 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 высокую эффективность функционирования газотранспортной системы и станут неотъемлемой составляющей системы автоматизированного оперативно-диспетчерского управления.

**Во второй главе** представлены постановка задачи и математическая модель транспортировки природного газа в газотранспортных системах с учетом динамики и допущением изотермического процесса Эйлера, основанная на сохранении массы и импульса при постоянстве энергии.

Нелинейная форма соотношений давления и потоков в математической модели ГТС и ее решение в общем случае относится к невыпуклым задачам нелинейного программирования. При формировании условий с ограничениями (величины потоков и давлений газа фиксированы на каждом узле входа/выхода) задача становится выпуклой. В инженерных приложениях задача заключается в разработке оптимального плана транспортировки природного газа, удовлетворяющей потребности в различных узлах ГТС при минимальном давлении, гарантирующий режим транспортировки.

Независимо от того, насколько тщательно спроектирован и построен трубопровод, всегда существует вероятность утечек. Поэтому системы обнаружения утечек играют ключевую роль в сведении к минимуму вероятность возникновения утечек и их последствий.

В диссертационной работе представлены методы обнаружения утечек, основанные на внешних измерениях и внутренние, основанные на измерении расхода и давления в трубопроводе: обнаружение волнового давления; метод баланса объемов; градиентный и аналитический методы.

Утечка всегда приносит большие и разнообразные убытки: приостановка транспортировки продукта, расходы на возмещение ущерба и потеря транспортируемого продукта. В диссертации представлено использование метода фильтра частиц (ФЧ) 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.

Проблемы обнаружения утечек в отдельных сегментах трубопровода в стационарном состоянии, как правило, решаются. Однако до сих пор не существует универсальной надежной системы, которая может работать в любых условиях эксплуатации для каждой трубопроводной системы и во время переходных процессов. В связи с чем проблема обнаружения утечек, вероятно, будет оставаться актуальной еще долгое время.

Сложности возникают из-за того, что отдельные трубопроводы отличаются друг от друга, и в каждом случае необходимо уделять особое внимание совершенно к разным обстоятельствам, которые являются решающими для данной системы обнаружения. Сжимаемость среды имеет большое влияние в случае газопроводов и менее важна для трубопроводов жидких углеводородов.

В газопроводах расход является функцией спроса на газ, на который поставщик газа не имеет большого влияния. Спрос на газ является переменным в течение двадцатичетырехчасового цикла (повышается в течение суток) и в течение года (повышается в периоды низких температур), температурных периодов.

Методы обнаружения утечек в системе газопроводов должны отвечать трем следующим задачам: обнаружение утечки, формирование сигнала тревоги, локализация утечки, оценка расхода утечки.

Важным фактором, определяющим полезность метода и алгоритма обнаружения утечек в трубопроводах, эквивалентно чувствительности к реальным повреждениям, является также устойчивость к возмущениям.

Это означает отсутствие ложных срабатываний, вызванных технологическими операциями (пуск/остановка компрессора/насоса, смена питающего резервуара, изменение типа транспортируемой среды, закрытие/открытие клапанов, смена приемных резервуаров).

Методы обнаружения утечек можно разделить на две общие категории: прямой (внешний) - обнаружение производится снаружи трубы с помощью специализированных датчиков или визуального наблюдения; косвенные (аналитические, внутренние) - обнаружение осуществляется на основе измерений и анализа параметров потока (в основном давление и скорость потока жидкости, иногда температура и плотность).

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 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.

При возникновении утечки на участке, последующие участки трубопровода также покажут характер этого отклонения. Таким образом, сравнивая имеющиеся промежуточные измерения давления с оценкой ФЧ в промежуточных узлах, локализует участок утечки.

ФЧ, как инструмент оценки профиля давления по длине трубопровода, функционирует в два этапа. На первом этапе предсказывает неизвестные состояния с помощью модели процесса. На втором этапе корректирует предсказанные состояния с помощью имеющихся измерений и восстанавливает начальное состояние для следующего узла трубопровода.

**В третьей главе** представлена математическая формулировка и структура уравнений, моделирующих процесс транспортировки природного газа, которая учитывает топологию трубопроводной системы, внутреннее состояние труб (коррозия) и физико-химические параметры транспортируемой среды.

Одним из ключевых показателей эффективности функционирования газотранспортной системы является оперативность обнаружения источников и причин небаланса газа «вход – выход», их устранение, контроль и регулирование производственной ситуации в режиме реального времени.

Разработаны алгоритмы контроля баланса газа и идентификации причин и источников небаланса газа в газотранспортной системе.

**В главе 4** представляет интерес разработанный алгоритм интеллектуальной системы оценки измерений в режиме реального времени для решения проблемы диагностики измерительной системы и коррекции грубых измерений, являющейся по существу интеллектуальным цифровым калибратором.

Предложена модель онлайн-мониторинга элементов измерительной системы, основанная на использовании автоассоциативных нейронных сетей с использованием аппарата статистического анализа исходных данных для группировки по их принадлежности к режимам технологического процесса для корректной самокоррекции ошибочных измерений в каждой из этих групп.

Подсистема калибровки приборов на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) состоит из следующих основных модулей: обучения оценки измерений, использующий архитектуру автоассоциативной нейронной сети 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.

Построение и реализация на промышленных объектах модель онлайн-мониторинга элементов измерительной системы обеспечит качество существующих систем управления как с точки зрения достоверности измерений, так и надежности.

**В главе 5** представлена структура разработанного программного комплекса статистического анализа достоверности измерений и обнаружения утечек в трубопроводах транспортировки природного газа.

Результаты оценки и корректировки грубых ошибок получены на основе исходных данных по напору компрессорной станции газотранспортной системы через каждые два часа начиная с 01. 11. 2019 в 10:00:0. Графические и табличные результаты приведены в разделе 5.3 диссертации. Смоделированы и исследованы три случая геометрического профиля трубы: прямолинейный трубопровод без уклона; прямолинейный трубопровод с уклоном; алгоритмы с учётом геометрического профиля трубы через гидравлические характеристики.

Получено 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.

Выводы достаточно полно отражают содержание диссертационной работы.

**Научная новизна работы.** Научная новизна заключается в использовании современных подходов и методов оценки эффективности сбалансированной работы газотранспортной системы.

На принципах системного единства и совместимости математического, информационного и технического обеспечения предложен комплексный подход к анализу режимов работы ГТС и причин небаланса транспорта природного газа.

С целью идентификации возможных причин и источников возникновения небаланса природного газа разработаны модели и алгоритмы анализа режимов работы ГТС и оценки достоверности показаний измерительной системы.

Разработан итерационный алгоритм идентификации мест утечек природного газа на линейных участках трубопроводов и интеллектуальная система диагностики измерительной системы и оценки достоверности измерений в режиме реального времени, коррекции грубых измерений.

**Теоретическая и практическая значимость.** Разработаны экспериментально-аналитические модели и алгоритмы оценки достоверности измерительной информации (обнаружение грубых ошибок) и ее восстановления. Представлена интеллектуальная система калибровки и корректировки показаний измерительной системы в онлайн режиме.

Для решения задач оперативной идентификации и локализации мест утечек в трубопроводах транспортировки жидких и газообразных углеводородов разработана математическая модель и алгоритм на основе метода фильтра частиц.

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

- статистического анализа данных измерительной системы, идентификации грубых ошибок и источников небаланса газа ГТС;
- идентификации и локализации утечек в трубопроводной системе транспортировки природного газа (моделирование и отладка программного комплекса осуществлялось на данных участка газотранспортной системы).

Рекомендована 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 ГТС и станет неотъемлемой составляющей системы автоматизированного диспетчерского управления.

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

**Соответствие автореферата основным положениям диссертации.** Автореферат диссертации в полном объеме соответствует содержанию диссертационной работы.

**Публикации, отражающие основное содержание диссертации.** Основное содержание диссертации с достаточной полнотой отражено в 12 печатных работах, 4 из них в журналах из перечня ВАК и одна публикация в журнале, индексируемом в международной базе данных Scopus.

**В качестве замечаний** необходимо отметить:

1. В работе не конкретизирован объект газотранспортной системы ПАО «Газпром», данные которой были использованы для решения задач оценки их достоверности и обнаружения утечек методом фильтра частиц;

2. В тексте оглавления диссертационной работы присутствует грамматическая ошибка (стр. 145, гл. 4.4.2);

3. В главе 2.4.4 нет пояснения условия устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви при численном решении некоторых дифференциальных уравнений в частных производных.

4. В главе 4.4.2 на рисунке 4.5, - Функциональная структура автоматизированной системы контроля и идентификации источников небаланса в газотранспортной системе, нет пояснения работы программных модулей идентификации утечек и оценки грубых ошибок в общей блок схеме.

5. При оформлении таблиц и рисунков имеются незначительные недостатки.

**Соответствие диссертации предъявляемым требованиям.** Работа соответствует паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами: «Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами; «Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами»; «Формализованные методы анализа, синтеза, исследования и оптимизации модульных структур систем сбора, хранения, обработки и передачи данных в АСУТП, АСУП, АСТПП и др.»; «Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСТПП и др.».

### **Заключение**

Диссертационная работа Костандяна Артура Валериевича соответствует паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача идентификации и локализации причин небаланса природного газа, обеспечивающая эффективность сбалансированного функционирования газотранспортной системы.

Считаю, что представленная диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, предусмотренным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора № 103ОД от 14.09.2023 г., а ее автор, Костандян Артур Валериевич, заслуживает присуждения ученой степени

кандидата технических наук по научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Диссертация и отзыв обсуждены и утверждены на заседании кафедры «Автоматизация технологических процессов» ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», (Протокол № 1 от 28. 08.2024 г.).

**Официальный оппонент**

Факультет «Информационные технологии»

д.т.н., профессор кафедры

«Информационные системы»

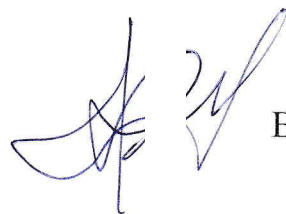
Научная специальность - Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов

ФГБОУ ВО «Тверской государственный

Технический университет»

Тел. +7(4822) 78-93-38

(вн. 210; 212; 213)



В.Н. Богатиков

Подпись профессора В.Н. Богатикова заверяю

Ученый секретарь ученого совета

ФГБОУ ВО

«Тверской государственный  
технический университет»

д.т.н., проф.



А.Н. Болотов

170026, Тверская область, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22

Контактные телефоны: +7 (4822) 78-89-00

Факс: +7 (4822) 52-62-92

Адреса электронной почты: [common@tstu.tver.ru](mailto:common@tstu.tver.ru)

Химико-технологический корпус ТвГТУ (ХТ) - г. Тверь, пр-т. Ленина, д. 25