

## 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.** Принятие решений по управлению режимами газотранспортной системы осуществляется на основе обработки большого объема информации от измерительной системы 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. В настоящее время поддержание сбалансированных режимов транспортировки природного газа является одной из ключевых задач эффективного функционирования трубопроводной газотранспортной системы.

Эффективность системы управления транспортировки природного газа по трубопроводу достигается применением математических моделей, разработкой алгоритмов идентификации причин и источников небаланса газа для поддержания оперативного принятия решений.

В настоящее время отсутствуют примеры системного решения и технической реализации задач 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 состоит из введения, пяти глав, выводов, списка используемой литературы. Общий объем диссертации составляет 188

страниц, включающие 48 рисунков, 15 таблиц и одно Приложение. Список цитируемой литературы содержит 179 наименований.

**Во введении** представлена общая проблема небаланса природного газа в газотранспортных системах, обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели исследования, изложены научная новизна и практическая значимость. Изложены методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности полученных результатов и личный вклад автора.

**В главе 1** представлен литературный обзор по теме диссертации - идентификация причин и источников небаланса природного газа в газотранспортных системах (ГТС). Представленные методики оценки и контроля неучтенного газа в газотранспортной системе основаны на математических моделях оценки и анализа режимов работы, возможных причин возникновения небаланса газа в ГТС. Рассмотрена и обоснована важность оценки достоверности измерительной информации при сведении баланса масс и энергии, сформулированы задачи диссертационной работы. Для повышения точности сведения потоковых балансов по массе и энергии обоснована важность и необходимость процедуры согласования данных при оптимизации управления газотранспортной системой и повышения точности сведения 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.

**В главе 2** представлена 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.

Системы обнаружения утечек играют ключевую роль в сведении к минимуму вероятности возникновения утечек и их последствий. Представленные методы обнаружения утечек основаны на внешних и внутренних измерениях расхода и давления в трубопроводе: обнаружение волнового давления; метод баланса объемов; градиентный и аналитический методы.

Задачи, решаемые по математической модели ГТС, являются невыпуклыми задачами нелинейного программирования. При формировании ограничений по потокам и давлениям газа на каждом узле входа/выхода задача становится выпуклой. В инженерных приложениях постановка задачи заключается в определении оптимального плана транспортировки природного газа, удовлетворяющего потребности в различных узлах газотранспортной системы при минимальном давлении, гарантирующем режим транспортировки. Сжимаемость среды имеет большое влияние в случае газопроводов и менее важна для трубопроводов жидких углеводородов. Предлагается 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 метода 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. Важным фактором, определяющим достоверность результатов метода и алгоритма обнаружения утечек, является чувствительность к реальным повреждениям и устойчивость к возмущениям. Это обеспечивает отсутствие ложных срабатываний, вызванных технологическими операциями (пуск/остановка

компрессора/насоса, смена питающего резервуара, изменение типа транспортируемой среды, закрытие/открытие клапанов, смена приемных резервуаров).

Фильтр частиц, как инструмент оценки профиля давления по длине трубопровода, функционирует в два этапа. На первом этапе он 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 главе 3** 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 газотранспортной системой.

Создание подсистемы оперативного обнаружения источников и причин небаланса газа «вход – выход», их устранение, контроль и регулирование производственной ситуации в режиме реального времени является важным показателем эффективности функционирования газотранспортной системы.

Представленная в диссертации математическая формулировка и структура уравнений, моделирующих процесс транспортировки природного газа, учитывает топологию трубопроводной системы, внутреннее состояние труб (коррозия) и физико-химические параметры транспортируемой среды.

Разработан алгоритм идентификации причин и источников небаланса природного газа в газотранспортной системе.

**В главе 4** представлена платформа информационных технологий построения системы, генерирующих знания об объекте управления, в виде приложений, в которых возможна работа в режимах как оффлайн, так и онлайн с адаптацией к изменениям в объекте в режиме реального времени.

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.

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

**В главе 5** представлены структуры разработанных программных комплексов 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 10:00:00. 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** заключается в использовании современных информационных технологий, методов прогнозирования и оценки эффективности сбалансированной работы газотранспортной системы:

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

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

Разработана система алгоритмов идентификации источников и причин небаланса газа в газотранспортных системах: 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 осуществлялись на данных участка газотранспортной системы).

Разработанный программный комплекс рекомендован к внедрению на газотранспортных предприятиях ПАО «Газпром» в системе оперативного обнаружения источников и причин небаланса газа, его устранения, контроля и регулирования 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 газотранспортной системы: 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 к согласованию данных.

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

**Публикации, отражающие основное содержание диссертации.** Основное содержание диссертации 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. Для сведения материального баланса и повышения точности используется процедура согласования данных измерительной системы. В диссертации не представлены способы согласования данных.

2. В диссертационной работе не представлен механизм интеграции разработанного комплекса программ идентификации утечек в трубопроводах со смежными программами управления газотранспортной системы;

3. Некоторые графические и табличные материалы в диссертации отображены нечетко.

4. В главе 4.2 «Интеллектуальная система оценки неисправности измерительной системы» не представлено обоснование выбора нейронной сети Хопфилда.

5. В главе 3.3.1. «Алгоритм оценки грубых ошибок» не обоснован выбор представленных в диссертации методов оценок грубых ошибок.

6. В диссертации нечетко определено понятие «неучтенные потери»

**Соответствие диссертации предъявляемым требованиям.** Работа соответствует паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами по пунктам: «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.»).

**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 сбалансированный эффективный режим функционирования газотранспортной системы.

Следует отметить использование условия устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви при численном решении дифференциальных уравнений в частных производных - 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.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Считаю, что представленная диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических 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 РХТУ им. Д.И. Менделеева № 103ОД от 14.09.2023 г.



Автор диссертационной работы Костандян Артур Валериевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

**Официальный оппонент**  
Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН,  
заведующий лабораторией № 40  
«Интеллектуальных систем  
управления и моделирования»,  
старший научный сотрудник,  
кандидат технических наук

Тел. +7(495) 198-17-20  
(доб. 1378)



А.Ф. Пащенко

03.09.2024

Подпись *А.Ф. Пащенко*

ЗАВЕРЯЮ  
ВЕД. ИНЖЕНЕР  
РАПОЖНЕВА И



Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН  
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65