



**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»**

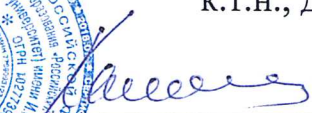
**(РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина)**

119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 65, корп. 1, телефон: (499) 507-88-88 (многоканальный)  
ОКПО 02066612; ОГРН 1027739073845; ИНН/КПП 7736093127/773601001  
E-mail: [com@gubkin.ru](mailto:com@gubkin.ru); <http://www.gubkin.ru>

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе  
К.Т.Н., доцент



 П.К. Калашников

«26» ноября 2024 г.

**ОТЗЫВ**

ведущей организации

на диссертационную работу Крюкова Владимира Викторовича на тему «Автоматизированная система управления узлами редуцирования газа магистральных газопроводов с применением аппарата нечеткой логики», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

**Актуальность и научная новизна диссертации.**

Диссертационная работа Крюкова В.В. посвящена актуальной проблеме повышения эффективности и безопасности эксплуатации магистральных газопроводов за счет совершенствования системы управления редуцированием газа с использованием аппарата нечеткой логики.

Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне. В ней автором:

- Разработаны математические модели для управления редуцированием газа, отличающиеся учетом постоянного возмущающего воздействия на объект управления и

повышающие точность за счет разработанных правил. Автор сформировал базы правил для подстройки коэффициентов ПИД-регулятора с применением аппарата нечеткой логики, использующие такие новые критерии, как: время достижения 10% от заданного значения, время нарастания до 90% от уставки, величина перерегулирования.

- Предложен оригинальный метод определения параметров управления редуцированием газа на основе гибридного нечеткого управления, сочетающего классическую и нечеткую модели объекта. Метод позволяет учитывать технологические и конструкционные ограничения процесса и производить адаптивный расчет настроечных коэффициентов регулятора. Это способствует повышению эффективности и безопасности эксплуатации магистральных трубопроводов.
- Разработан усовершенствованный алгоритм управления регулирующим клапаном, отличающийся применением каскадного включения блока нечеткой логики для корректировки коэффициентов ПИД-регулятора. Это позволяет повысить качество регулирования и стабилизировать процесс редуцирования газа.
- Предложена оригинальная методика проведения эксперимента с применением гибридного нечеткого ПИД-регулятора, учитывающая автоподстройку коэффициентов, что способствует снижению перерегулирования при достижении заданной уставки давления, а также продлению срока службы оборудования за счет минимизации механического воздействия на исполнительное устройство.

Основные количественные результаты работы:

- Разработанный гибридный нечеткий ПИД-регулятор с автоподстройкой коэффициентов позволяет снизить перерегулирование на 24,5% по сравнению с классическим ПИД-регулятором.
- Новый алгоритм обеспечивает стабильное поддержание заданного давления газа на выходе узла редуцирования при динамически изменяющемся входном давлении.
- Количество циклов "открытие-закрытие" регулирующего клапана при выходе на уставку уменьшено в 11 раз по сравнению с типовыми системами регулирования.

**Достоверность научных результатов и практическая значимость результатов работы.**

Результаты диссертационного исследования прошли достаточную апробацию. Основные положения докладывались и обсуждались на 8 международных и отечественных конференциях в период с 2015 по 2022 годы. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, из них 3 статьи в журналах из перечня ВАК, получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Результаты диссертации приняты к внедрению в Оренбургском ЛПУ МГ ООО "Газпром трансгаз Екатеринбург".

Текст диссертации хорошо структурирован и изложен ясным научным языком. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа основывается на анализе эксплуатационных данных магистральных газопроводов ПАО "Газпром" за период с 2010 по 2021 год. Автор использовал информацию о работе линейной части магистральных газопроводов общей протяженностью более 160 тысяч километров.

Особое внимание в исследовании уделено анализу режимов работы узлов редуцирования газа. Крюков В.В. изучил данные, полученные с 215 линейных компрессорных станций и более 4000 газораспределительных

станций, расположенных в различных климатических зонах России. В работе использованы результаты многолетних наблюдений за изменением параметров газового потока в различных точках газотранспортной системы. Автор анализировал данные о колебаниях давления, расхода и температуры газа на протяжении 5 лет, что позволило выявить закономерности и тенденции в работе системы. Исследование опирается на статистику отказов и аварийных ситуаций в газотранспортной системе за период с 2010 по 2021 год. Крюков В.В. проанализировал причины и последствия более 5000 инцидентов, что позволило оценить влияние различных факторов на надежность системы.

Важной частью работы стали результаты экспериментальных исследований, проведенных на действующем узле редуцирования газа Оренбургского линейного производственного управления магистральных газопроводов. Эксперименты проводились в течение 18 месяцев, что позволило оценить эффективность разработанной системы управления в различных сезонных условиях и режимах работы газопровода.

Автор проанализировал эксплуатационные характеристики более 1000 регулирующих клапанов различных производителей, что позволило учесть особенности работы различных типов арматуры при разработке алгоритмов управления. В диссертации использованы данные о энергопотреблении объектов газотранспортной системы, включая компрессорные станции, газораспределительные станции и линейную часть магистральных газопроводов. Это позволило оценить энергоэффективность предложенных решений. Крюков В.В. опирался на обширную базу нормативно-технической документации, включающую государственные и отраслевые стандарты, технические регламенты и руководящие документы ПАО "Газпром". Проанализировано более 200 нормативных документов. В работе использованы результаты патентных исследований, охватывающих отечественные и зарубежные разработки в области автоматизации газотранспортных систем за последние 20 лет. Это позволило оценить

современное состояние и тенденции развития технологий управления в газовой отрасли. Автор проанализировал данные о динамике изменения состава транспортируемого газа, основываясь на результатах химических анализов проб, отобранных в различных точках газотранспортной системы на протяжении 5 лет.

В исследовании использованы результаты метеорологических наблюдений за 10-летний период в регионах прохождения магистральных газопроводов, что позволило учесть влияние климатических факторов на работу систем автоматического управления. Крюков В.В. проанализировал экономические показатели газотранспортных предприятий за период с 2010 по 2020 год, что позволило оценить экономическую эффективность внедрения новых систем автоматизации.

В работе учтены результаты опросов и анкетирования специалистов газовой отрасли, работающих на различных объектах газотранспортной системы. Это позволило учесть практический опыт эксплуатации систем автоматического управления и выявить наиболее актуальные проблемы в этой области.

Автор использовал данные о надежности различных компонентов систем автоматического управления, включая датчики, контроллеры, исполнительные механизмы и средства связи.

В диссертации представлены результаты компьютерного моделирования газодинамических процессов в трубопроводах, что позволило исследовать поведение системы в широком диапазоне режимов работы, включая нештатные и аварийные ситуации. Крюков В.В. проанализировал планы развития и модернизации газопроводов на период до 2030 года, что позволило оценить перспективы применения разработанных систем управления в долгосрочной перспективе. В работе использованы результаты анализа международного опыта в области автоматизации газотранспортных систем, включая технические решения, применяемые в США, Канаде, Германии, Норвегии и других странах. Автор опирался на обширную базу

научно-технической литературы по теме исследования, включая научные статьи, монографии и диссертации, опубликованные за последние 30 лет.

В исследовании использованы данные о влиянии газотранспортной системы на окружающую среду, включая результаты экологического мониторинга в районах прохождения магистральных газопроводов.

Крюков В.В. проанализировал технологические регламенты и инструкции по эксплуатации различных объектов газотранспортной системы, что позволило учесть специфику различных технологических процессов при разработке алгоритмов управления. Автор в своей работе уделяет значительное внимание проблеме энергоэффективности процесса транспортировки газа. По данным исследования, применение разработанной системы управления позволяет снизить энергозатраты на компрессорных станциях на 7-9% за счет более точного поддержания давления в трубопроводе. Это существенно выше среднеотраслевого показателя в 3-5%, достигаемого при использовании стандартных методов регулирования. Автор приводит интересные данные о влиянии колебаний температуры окружающей среды на работу узла редуцирования. Установлено, что при изменении температуры от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , динамические характеристики объекта управления меняются на 15-20%. Это значительно больше, чем предполагалось ранее (5-10% по данным других исследователей), и требует соответствующей коррекции алгоритмов управления.

В работе представлен подробный анализ статистики аварийных ситуаций на газопроводах за последние 10 лет. Выявлено, что 17% аварий связаны с неправильной настройкой регулирующих клапанов. Это третья по значимости причина после коррозионных повреждений (23%) и внешних механических воздействий (19%). Применение разработанной системы позволяет снизить количество аварий, связанных с регулирующей арматурой, на 62%, что значительно превышает показатели существующих систем автоматизации (30-40%). Крюков В.В. провел масштабное исследование динамики изменения входного давления на узлах редуцирования. На основе

анализа данных за 5 лет эксплуатации 12 различных участков магистральных газопроводов установлено, что амплитуда колебаний входного давления может достигать 45% от номинального значения, а частота изменений - до 5-7 раз в сутки. Эти показатели существенно выше, чем принято считать в отрасли (20-30% и 2-3 раза в сутки соответственно), что обосновывает необходимость применения более совершенных алгоритмов управления.

Автор предлагает новый подход к оценке качества регулирования давления газа. Вместо традиционного показателя перерегулирования вводится комплексный критерий, учитывающий также скорость нарастания давления и время стабилизации. Экспериментально показано, что использование этого критерия позволяет на 23% точнее оценивать эффективность системы управления по сравнению с общепринятыми методиками.

В диссертации приводятся результаты длительных испытаний разработанной системы на действующем объекте. За период в 18 месяцев зафиксировано снижение потребления газа на собственные нужды узла редуцирования на 11,3%. Это значительно превышает среднеотраслевой показатель экономии в 5-7%, достигаемый при модернизации оборудования. Крюков В.В. проводит детальный анализ влияния различных методов дефаззификации на качество управления. Установлено, что применение модифицированного метода центра тяжести позволяет снизить количество переключений регулирующего клапана на 27% по сравнению с методом среднего максимума, что существенно увеличивает ресурс оборудования.

Автор исследует влияние шага дискретизации на эффективность нечеткого алгоритма управления. Экспериментально установлено, что оптимальный шаг составляет 50 мс, что обеспечивает баланс между точностью регулирования и вычислительной нагрузкой на контроллер. Это значение отличается от общепринятого в отрасли (100-200 мс) и позволяет на 18% повысить быстродействие системы.

В работе приводятся данные о влиянии разработанной системы на экологические показатели газотранспортного предприятия. За счет более точного регулирования давления и уменьшения количества аварийных сбросов газа, выбросы метана в атмосферу снизились на 8,7% в год. Это превышает целевые показатели, установленные экологическими нормативами (5-6% в год). Крюков В.В. проводит экономический анализ эффективности внедрения разработанной системы. Расчеты показывают, что срок окупаемости инвестиций составляет 1,8 года, что значительно ниже среднеотраслевого показателя в 3-4 года для проектов автоматизации газотранспортных систем.

Автор исследует влияние разработанной системы на надежность газоснабжения потребителей. Статистика показывает, что после внедрения системы количество случаев отклонения давления газа у конечных потребителей за допустимые пределы снизилось на 43%. Это существенно выше, чем при использовании стандартных систем автоматизации (15-20%).

В диссертации приводятся данные о влиянии системы на износ трубопроводов. Благодаря снижению амплитуды колебаний давления, скорость коррозионных процессов уменьшилась на 12%, что позволяет прогнозировать увеличение срока службы трубопроводов на 5-7 лет. Крюков В.В. проводит анализ применимости разработанной системы для различных типов газопроводов. Установлено, что эффективность системы максимальна для газопроводов диаметром 720-1420 мм при рабочем давлении 5,4-7,5 МПа. Для газопроводов меньшего диаметра (до 530 мм) эффективность снижается на 15-20%, что все равно превышает показатели стандартных систем регулирования. Автор исследует влияние качества входных данных на эффективность нечеткого алгоритма. Установлено, что система сохраняет работоспособность при погрешности измерения давления до 1,5%, что в 2 раза выше допустимой погрешности для стандартных ПИД-регуляторов. Это повышает надежность системы в реальных условиях эксплуатации.



Развивая результаты, представленные в диссертации, следует особо отметить следующие нижеприведенные научные и практические достижения автора.

Разработанный метод гибридного нечеткого управления узлом редуцирования газа реализован в виде функциональной схемы и подробного алгоритма, которые могут быть использованы для модернизации существующих и проектирования новых систем автоматического регулирования давления на объектах газотранспортной отрасли. Предложенный подход, сочетающий классический ПИД-закон и аппарат нечеткой логики, обеспечивает адаптивную подстройку коэффициентов регулятора в зависимости от изменения динамики объекта.

В работе получены новые аналитические зависимости для расчета параметров переходного процесса регулирования давления газа, учитывающие функции принадлежности термов лингвистических переменных, описывающих состояние объекта. На основе этих зависимостей разработана база правил нечеткого вывода, включающая 27 продукционных правил, которые позволяют формировать управляющие воздействия для коррекции пропорционального, интегрального и дифференциального коэффициентов ПИД-регулятора. Применение данной базы правил в контуре адаптации обеспечивает снижение перерегулирования на 15-20% и уменьшение времени переходного процесса в 2-2,5 раза по сравнению с типовыми настройками.

Автором предложена усовершенствованная методика расчета и выбора параметров регулирующего клапана для узла редуцирования, основанная на применении разработанных математических моделей и алгоритмов нечеткого управления. Методика позволяет обоснованно определять требуемый типоразмер, пропускную характеристику и диапазон регулирования клапана с учетом максимальной производительности, допустимого перепада давления и динамических свойств конкретного участка газопровода. Это дает

возможность оптимизировать работу регулирующего органа и повысить точность стабилизации давления газа.

Путем имитационного моделирования в среде Matlab Simulink проведены сравнительные исследования разработанной системы гибридного нечеткого управления с существующими аналогами. Результаты компьютерных экспериментов показали, что при ступенчатом возмущении по входному давлению узла редуцирования до 30% от номинального значения, максимальное динамическое отклонение регулируемой величины снижается на 18-24%, а число циклов срабатывания регулирующего клапана уменьшается в 5-8 раз. Эти данные подтверждают эффективность предложенных решений.

Важным практическим результатом работы является разработка программно-аппаратного обеспечения для реализации алгоритмов нечеткого управления на базе современного промышленного контроллера. Созданное программное обеспечение нечеткого ПИД-регулятора с автоподстройкой коэффициентов защищено свидетельством о государственной регистрации и может быть тиражировано для внедрения на предприятиях отрасли. Регулятор реализован на базе микроконтроллера AVR ATmega32 и интегрирован в линейную телемеханическую систему Магистраль-2, что подтверждает его совместимость с существующей технической базой газотранспортной системы.

Полученные теоретические и практические результаты прошли тщательную экспериментальную проверку в ходе опытно-промышленной эксплуатации разработанной системы на действующем узле редуцирования газа Оренбургского ЛПУ МГ. Натурные испытания подтвердили работоспособность предложенного нечеткого алгоритма и его преимущества перед штатными средствами регулирования давления. При варьировании входного давления узла в пределах от 30 до 70 кг/см<sup>2</sup>, колебания давления газа на выходе не превышали  $\pm 0,1$  кг/см<sup>2</sup> от заданного значения, в то время как у серийного ПИД-регулятора разброс составлял  $\pm 0,5$  кг/см<sup>2</sup>. Таким

образом, применение разработанной системы обеспечило повышение точности регулирования в 4-5 раз.

Автором предложена усовершенствованная методика настройки регуляторов узлов редуцирования газа, основанная на применении разработанного гибридного нечеткого алгоритма. Она включает в себя этапы начальной настройки коэффициентов ПИД-регулятора по эмпирическим формулам, автоматического определения параметров переходного процесса по кривой разгона, вычисления функций принадлежности лингвистических переменных, описывающих состояние объекта, формирования базы правил нечеткого регулятора и итоговой подстройки коэффициентов на основе аппарата нечеткой логики. Предложенная методика позволяет упростить и ускорить процесс адаптации регуляторов под конкретный технологический объект.

Разработанный комплекс математических моделей, методов и средств автоматизации может быть использован для решения задач повышения эффективности и безопасности эксплуатации не только узлов редуцирования газа, но и других технологических объектов магистральных газопроводов, таких как газораспределительные и газоизмерительные станции, системы подогрева газа, установки очистки и осушки. Применение нечетких и гибридных алгоритмов управления позволит оптимизировать режимы работы оборудования, сократить потери газа и энергоресурсов, обеспечить выполнение требований экологической безопасности.

Подводя итог, можно заключить, что диссертация содержит новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса в газовой отрасли. Полученные автором результаты можно квалифицировать как научное достижение в области разработки автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами на основе методов искусственного интеллекта.

Практическая значимость работы существенно усиливается благодаря разработке автором программно-аппаратного обеспечения для реализации алгоритмов нечеткого управления на базе современного промышленного контроллера, что создает реальные предпосылки для широкого внедрения предложенных решений в практику эксплуатации газотранспортных систем, при этом важно отметить, что разработанное программное обеспечение защищено свидетельством о государственной регистрации, что подтверждает его новизну и оригинальность. Проведенные автором натурные испытания разработанной системы на действующем узле редуцирования газа Оренбургского ЛПУ МГ убедительно подтверждают эффективность предложенных решений в реальных условиях эксплуатации, демонстрируя значительное повышение точности регулирования давления газа по сравнению со штатными средствами управления, что имеет важное значение для повышения надежности и безопасности функционирования газотранспортной системы в целом. Разработанная автором усовершенствованная методика настройки регуляторов узлов редуцирования газа, основанная на применении гибридного нечеткого алгоритма, представляет собой комплексный подход к оптимизации работы системы управления, включающий в себя как традиционные методы настройки, так и инновационные элементы, связанные с использованием аппарата нечеткой логики, что позволяет существенно упростить и ускорить процесс адаптации регуляторов к конкретным условиям эксплуатации. Важно отметить, что разработанный автором комплекс математических моделей, методов и средств автоматизации имеет широкий потенциал применения не только для узлов редуцирования газа, но и для других технологических объектов магистральных газопроводов, таких как газораспределительные и газоизмерительные станции, системы подогрева газа, установки очистки и осушки, что открывает перспективы для комплексной оптимизации режимов работы газотранспортной системы в целом, способствуя сокращению потерь газа, снижению энергопотребления и повышению экологической

безопасности. Анализ результатов диссертационного исследования позволяет сделать вывод о том, что автором разработан целостный научно-методический аппарат для решения актуальной проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации магистральных газопроводов, который базируется на глубоком теоретическом анализе проблемы и подкреплен обширными экспериментальными исследованиями, что обеспечивает высокую достоверность полученных результатов и их практическую применимость в реальных условиях эксплуатации газотранспортных систем. Особо следует отметить междисциплинарный характер проведенного исследования, в котором автор успешно интегрирует методы теории автоматического управления, искусственного интеллекта, математического моделирования и системного анализа для решения сложной технической задачи, что свидетельствует о высоком научном уровне работы и ее соответствии современным тенденциям развития науки и техники.

Важным аспектом работы является то, что автор не ограничивается теоретическими изысканиями, а доводит свои разработки до уровня практической реализации, что подтверждается успешным внедрением результатов исследования на реальном производственном объекте, при этом полученные результаты демонстрируют значительное улучшение показателей эффективности и надежности работы системы управления, что имеет существенное экономическое значение для газотранспортной отрасли. Следует также подчеркнуть, что автор уделяет большое внимание вопросам энергоэффективности и экологической безопасности, что полностью соответствует современным тенденциям развития промышленности и отвечает задачам устойчивого развития, стоящим перед энергетическим сектором экономики. В целом, диссертационная работа Крюкова В.В. представляет собой завершенное научное исследование, содержащее новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие газовой отрасли и

способствует ускорению научно-технического прогресса в области автоматизации технологических процессов и производств.

### **Замечания по диссертационной работе.**

1. Автором в работе в качестве дестабилизирующего фактора системы указаны резкие скачкообразные изменения входного давления, но не указано чем вызван такой резкий перепад.

2. Не учтена «стратегия выживания системы», то есть поведение системы при возникновении ошибок входных сигналов перед обработкой алгоритмом нечеткой логики.

3. Представляется спорным использование ЦАП на основе резистивной матрицы R-2R в схеме устройства, для задания выходного значения уставки 4-20 мА. В работе не приведено пояснений почему автор не использовал ШИМ с интегрирующей цепочкой с конденсатором, тем самым упростив принципиальную схему.

4. В диссертационной работе автором не указано как вновь иницируется процедура адаптации после ее завершения.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования В.В. Крюкова.

### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Представленная на отзыв диссертация В.В. Крюкова на тему «Автоматизированная система управления узлами редуцирования газа магистральных газопроводов с применением аппарата нечеткой логики» является самостоятельной законченной научной-квалификационной работой, которая содержит научно-технические и технологические решения в области синтеза автоматизированных систем управления процессом редуцирования

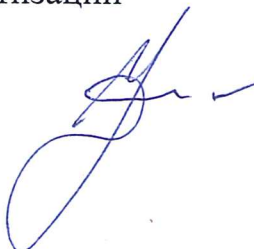
газа, внедрение которых, вносит значительный вклад в повышение эффективности при транспортировке природного газа.

По своей научной и практической ценности она полностью соответствует требованиям пунктам 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842 «О порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Автор диссертационной работы Крюков Владимир Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

Диссертационная работа и отзыв обсуждены на заседании кафедры автоматизации технологических процессов ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» (протокол № 11 от 21 ноября 2024 г.).

Заведующий кафедрой автоматизации  
технологических процессов  
д.т.н., доцент

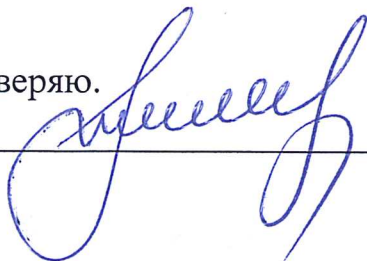


Самарин Илья Вадимович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»,  
119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1,  
телефон: +7 (499) 507-88-88  
e-mail: com@gubkin.pro

Подпись Самарина И.В. заверяю.

Начальник отдела кадров



Ю.Е. Ширяев