

На правах рукописи



ЯНЧУК ВИТАЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА КАСКАДНОГО ПониЖЕНИЯ
ДАВЛЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОПРОВОДОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ЗАПОРНО-РЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2024

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью
«Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий –
Газпром ВНИИГАЗ»

Научный руководитель: **Кузьбожев Александр Сергеевич**,
доктор технических наук, профессор,
начальник отдела Надежности и ресурса
Северного коридора ГТС филиала
ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта

Официальные оппоненты: **Китаев Сергей Владимирович**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Транспорт и хранение
нефти и газа» Федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»
Земенкова Мария Юрьевна,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Транспорт
углеводородных ресурсов» Федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Тюменский индустриальный
университет»

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

Защита диссертации состоится 22 января 2025 г. в 15:30 на заседании
диссертационного совета 75.1.011.01 в ООО «Газпром ВНИИГАЗ», по адресу:
142717, Московская область, г.о. Ленинский, поселок Развилка, ул. Газовиков,
здание 15, строение 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ООО «Газпром
ВНИИГАЗ» <http://vniigaz.gazprom.ru/activities/other/education/discouncil/511.001.03>.

Автореферат разослан «___» 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Татьяна Ивановна Лаптева

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

При транспортировке газа по магистральным газопроводам (МГ) и газопроводам-отводам преимущественно применяют следующую технологическую схему: газ с высоким давлением (5 – 10 МПа) транспортируется до газораспределительных станций (ГРС), на которых в одну ступень осуществляют понижение давления газа путем редуцирования до давления 0,6 – 1,2 МПа. При снижении давления газа на 1 МПа происходит его охлаждение в среднем на 5,0 – 5,5 °С. Для исключения проблем, вызванных охлаждением газа, таких как образование гидратов, повреждение и износ герметизирующих узлов, на ГРС применяют предварительный подогрев транспортируемого газа с помощью подогревателей. Основным недостатком использования предварительного подогрева являются большие расходы на топливный газ.

Другие известные способы понижения давления и подогрева транспортируемого расширяющегося потока газа (вихревые трубы, пульсационные и сверхзвуковые теплообменники и т.п.) сложны в эксплуатации и являются недостаточно эффективными, так как не способны обеспечить нагрев всего потока транспортируемого газа. Простые, надежные, эффективные и экономичные способы подогрева газа в процессе понижения давления отсутствуют. Предлагается новая научная идея ступенчатого понижения давления газа в газопроводе-отводе, при котором нагрев транспортируемого газа будет осуществляться за счет использования запасенной тепловой энергии, возникающей при сжатии газа газоперекачивающими агрегатами и подаче его в магистральный газопровод, а также за счет геотермального маршрутного теплообмена с грунтом.

Поэтому разработка метода каскадного понижения давления в газопроводах с применением геотермального маршрутного подогрева газа является актуальным направлением исследований.

Степень разработанности темы исследования

Степень разработанности темы исследования в части обоснования термобарических параметров и режимов транспортировки газа по газопроводам достаточно высока. Данными вопросами занимались академические и отраслевые институты, многие высшие учебные заведения. В ООО «Газпром ВНИИГАЗ» изучением проблем транспорта газа занимались В.В. Харионовский, И.И. Велюлин, К.И. Джафаров, Я.С. Мкртычан, В.А. Мамаев, С.В. Карпов, В.М. Шарыгин, в том числе тепломассообменных процессов при транспортировке газа Г.Э. Одишария, З.Т. Галлиулин, И.Е. Ходанович, Б.Л. Кривошеин.

При этом есть ряд нерешенных научно-практических задач, которые требуют решения при переходе от существующей одноступенчатой схемы понижения давления в газопроводе к многоступенчатой распределённой схеме понижения давления.

Требуется разработать методику определения термобарических режимов эксплуатации газопроводов-отводов, оснащенных линейно распределенными регуляторами давления. Необходимо усовершенствование линейного регулято-

ра давления с целью повышения надежности для условий повышенной скорости потока газа.

Целью работы является разработка метода каскадного понижения давления в газопроводах с применением геотермального маршрутного подогрева газа с учетом особенностей грунтовой вмещающей среды в рамках обоснования термобарических режимов и параметров эксплуатации газопроводов.

Для реализации указанной цели были поставлены следующие **основные задачи исследования:**

1. Определить недостатки и ограничения стандартной технологии предварительного нагрева газа на ГРС, определить и обосновать перечень отказов и нарушений, возникающих при несоблюдении температурных режимов транспортировки газа.

2. Выполнить разработку и расчетное обоснование метода каскадного понижения давления газа в газопроводах-отводах. Выполнить оценку энергоэффективности разрабатываемого метода.

3. Разработать и изготовить опытно-промышленный образец линейного узла редуцирования (ЛУР). Выполнить опытно-промышленную апробацию технологии каскадного понижения давления газа в действующем газопроводе-отводе.

4. Определить недостатки и ограничения различных видов устройств, используемых для регулирования давления и расхода газа в магистральных и технологических газопроводах, разработать новую конструкцию регулирующего устройства, лишенную недостатков аналогов.

Научная новизна

1. Предложен новый научный подход к энергосбережению при трубопроводной транспортировке природного газа по газопроводам-отводам, обеспечивающий уменьшение объемов генерации тепловой энергии для нагрева газа перед узлом редуцирования ГРС за счет использования тепловой энергии, возникающей попутно при компримировании газа на компрессорных станциях, а также за счет использования геотермальной энергии грунта.

2. Разработан новый метод каскадного понижения давления газа в газопроводах-отводах, предполагающий использование последовательно расположенных ЛУР, распределенных вдоль газопровода. Получены расчетные выражения для определения оптимальной величины перепада давления транспортируемого газа на каждом ЛУР с учетом параметров расхода, давления и температуры газа, температуры грунта, температуры воздуха.

3. Разработана новая конструкция линейного запорно-регулирующего устройства, включающая спрофилированные каналы в шаровом запирающем органе и обеспечивающая перепуск газа с заданным перепадом давления и полно проходным сечением.

Теоретическая значимость результатов работы

Разработанные автором положения, посвященные расчетно-экспериментальному обоснованию метода каскадного понижения давления в газопроводах-отводах, с применением линейно распределенных запорно-редуцирующих устройств служат основой для совершенствования методов эксплуатации газопроводов.

Полученные результаты позволяют оптимизировать и скорректировать термобарические параметры и режимы эксплуатации газопроводов-отводов на основе полученных расчетных выражений для определения оптимальной величины перепада давления транспортируемого газа, с учетом расхода, давления и температуры газа, температуры грунта, температуры воздуха.

Практическая ценность результатов работы

Полученные результаты позволяют обосновать практические энергосберегающие мероприятия по принципиальному улучшению полезного использования и перераспределения тепловой энергии, безвозвратно дважды теряемой в существующих технологических схемах компримирования и дросселирования транспортируемого трубопроводного газа, усовершенствовать конструкцию линейных запорно-регулирующих устройств для практического применения при каскадном понижении давления в газопроводах-отводах.

Выполнена практическая апробация работы на действующем газопроводе-отводе Микунь – Сыктывкар с изготовлением, монтажом и опытно-промышленным опробованием двух линейных узлов регуляторов давления газа. При опытно-промышленной апробации метода каскадного снижения давления транспортируемого газа достигнуто сокращение потребления топливного газа на ГРС на 88 %.

Сопутствующий практический эффект от реализации метода каскадного снижения давления транспортируемого газа заключается в повышении безопасности эксплуатации газопровода-отвода за счет уменьшения воздействия на промышленную и гражданскую инфраструктуру повреждающих факторов, в случае потенциально возможного аварийного разрушения газопровода.

Личный вклад автора

Заключается в предложении принципиальной научной идеи, заложенной в основу метода каскадного понижения давления газа в газопроводах-отводах, выполнении расчетной оценки эффективности предлагаемого метода, разработке конструкции ЛУР, распределенных вдоль газопровода, организации и координации проведения опытно-промышленной апробации предлагаемого метода.

Результаты, выводы и положения, выносимые на защиту, получены автором лично. В совместных работах автору принадлежит ведущая роль в разработке общей структуры работы, формировании целостной концепции научного исследования, в постановке задач и теоретических подходах к их решению, обобщении, обработке и апробации полученных результатов, подготовке публикаций по выполненной работе и формулировании выводов.

Автор лично принимал участие в апробации результатов исследований технологии каскадного понижения давления при проведении опытно-промышленного применения на газопроводе-отводе Микунь – Сыктывкар (ООО «Газпром трансгаз Ухта») в 2019, 2021, 2022 и 2023 г.

Методы исследования

Решение поставленных задач производилось в соответствии с общепринятой методикой выполнения научных исследований, включающей обобщение и анализ предшествующих исследований, разработку рабочих гипотез, натурные и аналитические исследования, разработку численного эксперимента и его методического обеспечения. При выполнении натурных исследований применялись измерение, сравнение и обобщение с расчетными данными. При проведении теоретических исследований применялось математическое моделирование, методы статистической обработки данных, анализ, обобщение.

Положения, выносимые на защиту:

– новый принцип энергосбережения при организации транспортировки газа по газопроводам-отводам к ГРС за счет каскадного (ступенчатого) понижения рабочего давления с использованием тепловой энергии, получаемой при компримировании газа на компрессорных станциях, использования тепловой энергии грунта;

– новый метод каскадного (ступенчатого) понижения рабочего давления при эксплуатации газопроводов с применением линейно распределенных запорно-регулирующих устройств;

– оптимизация и расширение функциональных свойств технологического оборудования в составе газопроводов-отводов с целью обеспечения регулируемого перепуска газа с заданным перепадом давления.

Степень достоверности результатов и выводов

Достоверность обеспечена корректным использованием реальных фактических данных, соответствующих математических методов и формул, вычислительных программных комплексов и методов математического моделирования. Результаты, полученные в процессе исследований, не противоречат результатам, представленным в работах других авторов.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

– на Международной научно-технической конференции имени профессора Н.А. Малюшина «Нефтегазовый терминал» (ТИУ, г. Тюмень, 28 – 29 мая 2020 г.);

– XVI Международной учебно-научно-практической конференции (УГНТУ, г. Уфа, 17 – 18 ноября 2021 г.);

– Международной конференции «Рассохинские чтения» (УГТУ, г. Ухта, 06 – 07 февраля 2020 г., 04 – 05 февраля 2021 г., 03 – 04 февраля 2022 г., 02 – 03 февраля 2023 г.);

– Ежегодном семинаре-совещании «Повышение надежности эксплуатации ГРС ООО «Газпром трансгаз Ухта» (29 ноября – 02 декабря 2022 г.).

Соответствие паспорту специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 2.8.5 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», а именно области исследования по пунктам:

1. Технологические процессы и технические средства для проектирования, сооружения, эксплуатации, теоретические и практические основы взаимодействия объектов трубопроводного транспорта с окружающей средой с целью создания высокоэффективных, энерго- и ресурсосберегающих, надежных, механически и экологически безопасных сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта.

2. Научные основы системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования конструкций, прочностных, гидромеханических, газодинамических и теплофизических расчетов сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, подземных и наземных газонефтехранилищ, терминалов, инженерной защиты и защиты от коррозии, организационно-технологических процессов их сооружения, эксплуатации, диагностики, обеспечения системной надежности, механической и экологической безопасности.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 работ, из них 5 в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК при Минобрнауки России.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 173 страницы текста, 95 рисунков, 18 таблиц и списка литературы из 121 наименования, 1 приложение.

Содержание работы

Во введении обоснованы актуальность и значимость выбранной темы, степень ее разработанности, охарактеризованы научно-методические пути ее решения.

В первой главе выполнен анализ существующей промышленной технологии снижения давления газа на ГРС, описана проблема сопутствующего охлаждения газа в процессе снижения давления, определены недостатки существующих технических решений подогрева транспортируемого газа.

При снижении давления газа на 1 МПа в процессе его дросселирования на ГРС, температура газа уменьшается на 4,5 – 5,5 °С. Выполнено моделирование распределения температуры газа в процессе снижения давления в клапане-регуляторе при дросселировании. Установлено, что при снижении давления с 4,3 до 0,6 МПа температура газа на выходе клапана-регулятора составляет в среднем минус 5 °С, при этом на выходе регулятора поток газа характеризуется

существенной температурной неоднородностью с наличием зон охлаждения газа до минус 18 °С.

Нормативные требования предписывают поддержание температуры газа не ниже минус 10 °С на обычных грунтах, на пучинистых грунтах – не ниже 0 °С. Несоблюдение температурных режимов газа на выходе ГРС приводит к обледенению (обмерзанию) регулирующих и запорных устройств, контрольно-измерительных приборов оборудования, образованию газовых гидратов, морозному пучению грунтов.

Поэтому основным направлением предупреждения данных негативных процессов является предварительный нагрев газа, для чего преимущественно используют подогреватели газа, работающие на газовом топливе (природный газ). Выполненный анализ показывает, что подогреватели прямого нагрева являются недостаточно надежными, а подогреватели с промежуточным теплоносителем являются недостаточно энергетически эффективными.

Все известные направления улучшения подогревателей, в основном, сводятся к повышению энергоэффективности подогревателей газа в целях снижения расхода топливного газа. Совершенствуют теплоизоляцию, горелочные устройства, другие конструктивные элементы подогревателей, оставляя при этом неизменным технологический принцип подогрева транспортируемого газа. Для нагрева газа при транспортировке также активно предлагаются другие способы нагрева газа, которые для нагрева используют упругую энергию газа для ее преобразования в тепло (вихревые и ударные трубы, пульсационный эффект и др.). Однако опытные устройства данного направления сложны в эксплуатации и являются недостаточно эффективными, так как не способны обеспечить нагрев всего потока транспортируемого газа.

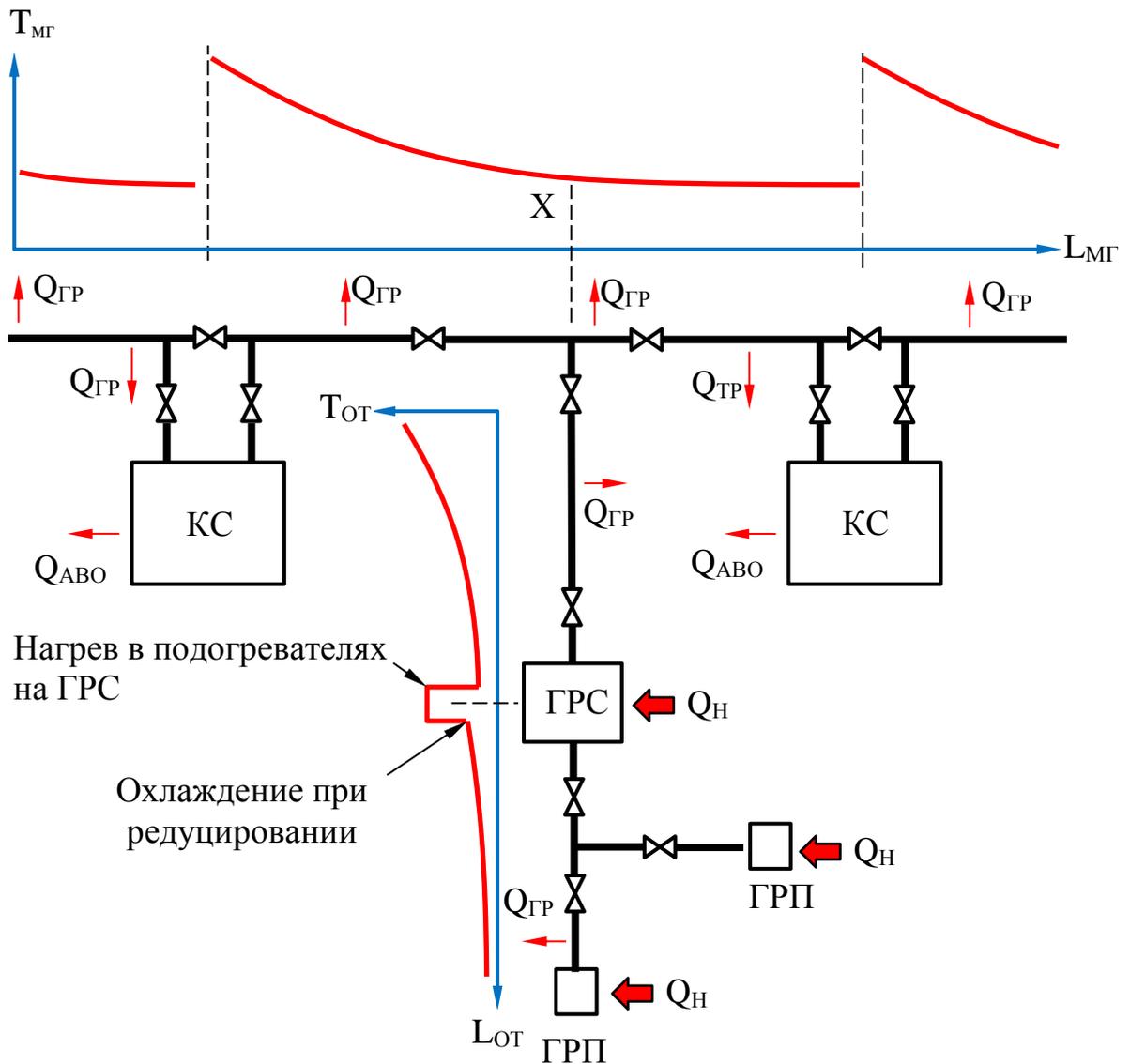
Принципиально новые направления подогрева газа при его трубопроводной транспортировке до настоящего времени не прорабатывались. Поэтому поставленная в настоящей работе цель – разработка метода каскадного понижения давления в газопроводах с применением геотермального маршрутного подогрева газа является актуальным направлением исследований.

Во второй главе выполнена разработка нового метода каскадного понижения давления газа в газопроводах-отводах.

Исследования включали в себя анализ тепловых потерь при трубопроводной транспортировке природного газа по магистральным газопроводам, газопроводам-отводам к ГРС, газораспределительным сетям низкого давления.

Особенности изменения температурного режима природного газа в процессе трубопроводной транспортировки между КС, а также между магистральным газопроводом и ГРС в виде графика показаны на рисунке 1.

Газ, отбираемый из магистрального газопровода и транспортируемый по газопроводу-отводу, особенно в случаях низкого уровня потребления, охлаждается за счет теплообмена с грунтом, далее нагревается на ГРС с помощью подогревателей, после чего за счет редуцирования снижается давление газа, сопровождаемое охлаждением газа. При транспортировке газа по газораспределительным газопроводам протекают аналогичные теплообменные процессы, охлаждение газа также происходит за счет теплообмена с внешней средой (с грунтом при подземной прокладке газопровода, с воздухом – при надземной прокладке).



$Q_{ГР}$ – тепло, отводимое в грунт; $Q_{АВО}$ – тепло, отводимое на КС в воздух; $Q_{Н}$ – тепло, подводимое к газу на ГРС; $T_{МГ}$ – температура газа в магистральном газопроводе; $T_{ОТ}$ – температура газа в газопроводе-отводе

Рисунок 1 – Схема к оценке изменения температуры газа в магистральном газопроводе и газопроводе-отводе

И далее, процесс нагрев-охлаждение газа повторяется при редуцировании на газораспределительных пунктах (ГРП), на которых также может быть предусмотрен предварительный подогрев газа.

Очевидно, что при трубопроводной транспортировке газа дважды возникают безвозвратные тепловые потери, которые обусловлены:

1) охлаждением газа с помощью аппаратов воздушного охлаждения компрессорных цехов (в целях компенсации избыточного нагрева газа при компримировании), а также при теплообмене газопроводов с окружающей средой;

2) подводом к газу тепловой энергии (в целях компенсации избыточного охлаждения газа при редуцировании), обычно получаемой при сгорании газообразного топлива на ГРС и ГРП.

Указанные тепловые потери существенно снижают энергоэффективность трубопроводной транспортировки газа. Для частичной компенсации указанных тепловых потерь предложен новый научный подход к энергосбережению при трубопроводной транспортировке природного газа по газопроводам-отводам, заключающийся в каскадном понижении давления в газопроводах-отводах, с применением линейно распределенных запорно-редуцирующих устройств.

В качестве объекта исследований предлагаемого метода выступает подземный газопровод-отвод Микунь – Сыктывкар протяженностью 90 км, выполненный из труб наружным диаметром 720 и 530 мм. Газ в газопровод-отвод подается из системы МГ Ухта – Торжок, с рабочим давлением 5,4 или 7,5 МПа. Фактическое рабочее давление в газопроводе-отводе 4,2 – 4,5 МПа, температура газа на входе 20 °С. Температура грунта на глубине заложения газопровода-отвода в завершении зимнего периода составляет 2 °С. Расход газа, приведенный к нормальным условиям, составляет 150000 м³/ч.

В процессе трубопроводной транспортировки по газопроводу-отводу газ охлаждается до температуры грунта. На ГРС давление газа понижают от 4,2 до 0,6 МПа, в результате, без предварительного подогрева газа его температура на выходе ГРС составила бы примерно минус 18 °С (рисунок 2).

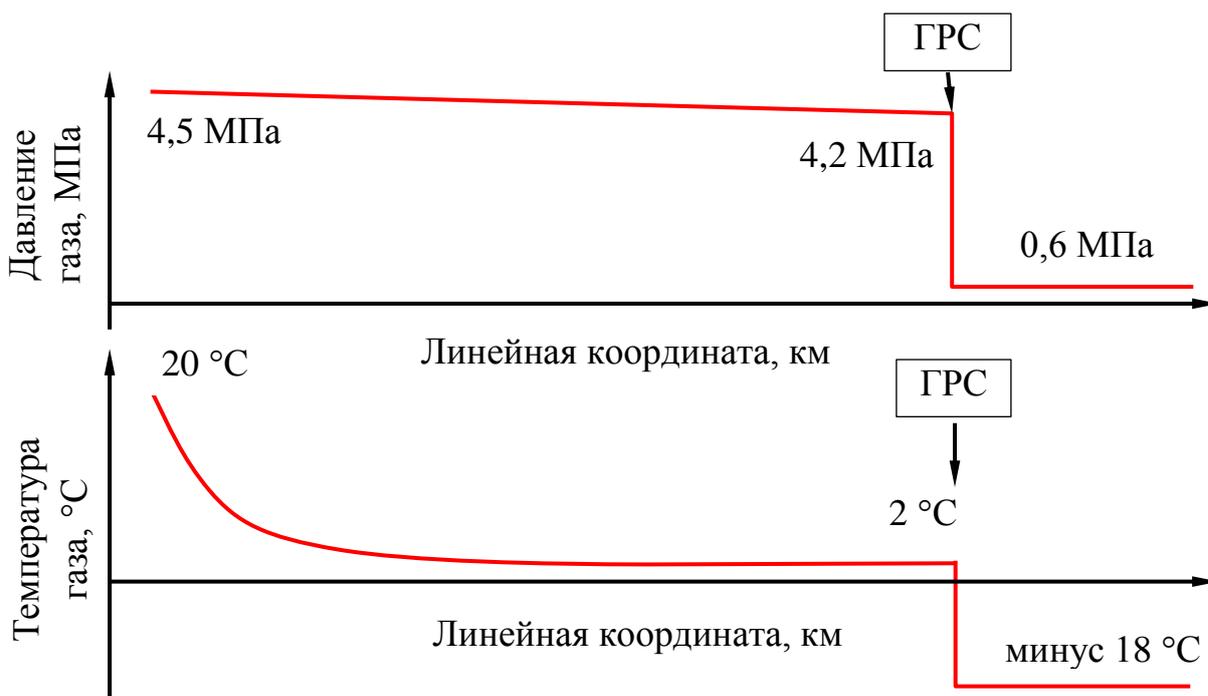


Рисунок 2 – Изменение термобарических параметров газа при транспортировке по газопроводу-отводу (без подогрева газа на ГРС)

Для уменьшения тепловых потерь, обусловленных отводом тепла от газопровода в грунт, предложена технология каскадного понижения давления в газопроводе-отводе с помощью линейных регуляторов, расположенных в определенном порядке, в зависимости от протяженности трассы газопровода-отвода, грунтовых условий на глубине заложения газопровода, интенсивности процессов сезонного промерзания и оттаивания грунта. Уменьшение расхода топлив-

ного газа при редуцировании будет обеспечено за счет реализации следующих ключевых принципов:

- уменьшения величины перепада давления при редуцировании на ГРС;
- снижения давления газа в точке его отбора из магистрального газопровода, сопровождаемого охлаждением газа до температуры менее температуры грунта, с последующим нагревом за счет естественного теплообмена между газопроводом-отводом и грунтом;
- повторения процесса промежуточного снижения давления в линейных регуляторах.

На газопроводе-отводе смонтированы два линейных регулятора давления: № 1 в точке подключения газопровода-отвода к МГ (0 км), № 2 – на 80-м км газопровода-отвода. Исследования выполнены с использованием расчетных выражений, описывающих теплообменные процессы газопровода с грунтом.

Температуру газа в любой точке газопровода определяли из выражения

$$T = T_0 + (T_H - T_0) \cdot e^{ax} - D_i \cdot \frac{P_H^2 - P_K^2}{2 \cdot a \cdot L \cdot P_{cp}} \cdot (1 - e^{-ax}), \quad (1)$$

- где T_0 – температура грунта, К;
 T_H – температура газа в начале участка газопровода, К;
 x – расстояние от начала газопровода до рассматриваемой точки, км;
 D_i – среднее на участке значение коэффициента Джоуля-Томсона, К/МПа;
 P_H, P_K – начальное и конечное давления газа на участке, МПа;
 P_{cp} – среднее давление в газопроводе, МПа;
 a – коэффициент режима теплового взаимодействия газопровода с грунтом, определяли из выражения

$$a = 225,5 \cdot \frac{K_{cp} \cdot d_H}{q \cdot \Delta \cdot C_p \cdot 10^6}, \quad (2)$$

где K_{cp} – средний коэффициент теплопередачи от газа грунту, Вт/(м²·К);

- d_H – наружный диаметр газопровода, м;
 q – пропускная способность газопровода, млн м³/сут;
 Δ – относительная плотность газа по воздуху при нормальных условиях;
 C_p – средняя изобарная теплоемкость газа, кДж/(кг·К).

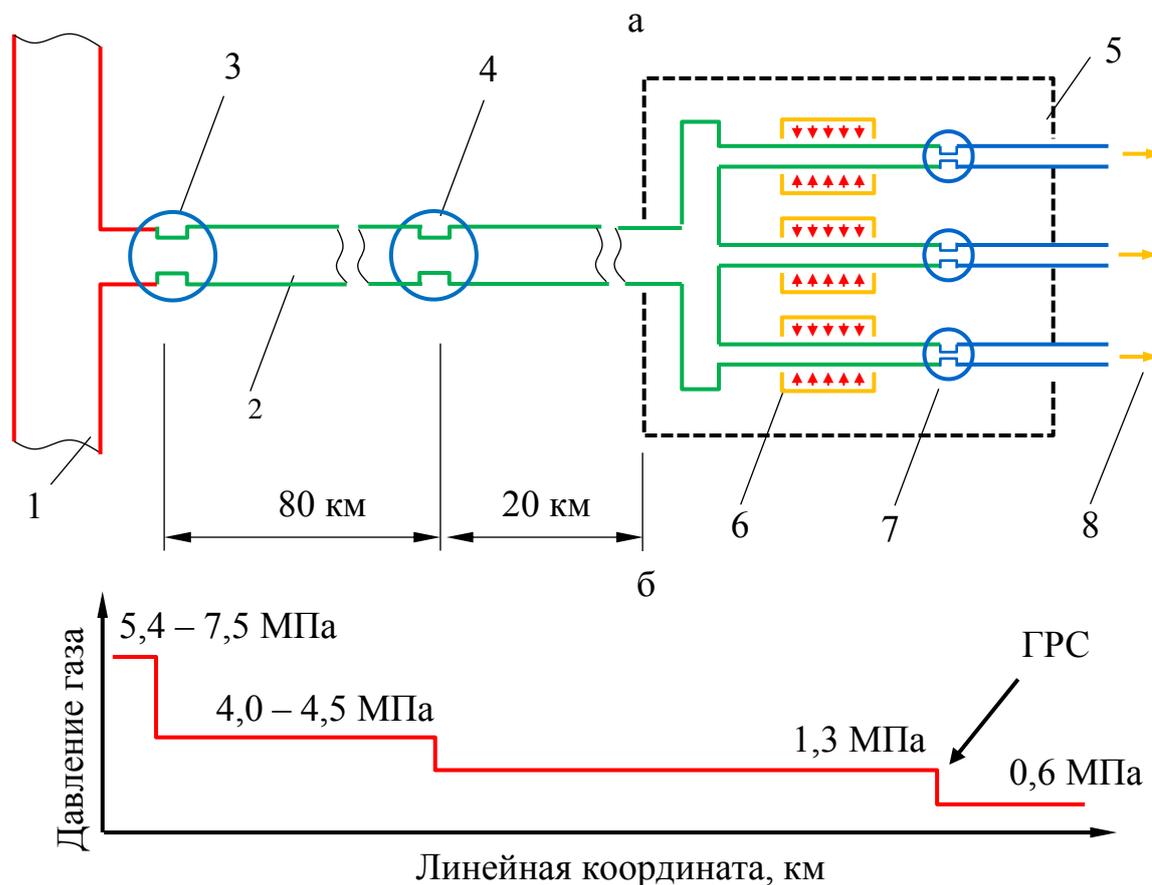
Коэффициент теплопередачи от газа в грунт (K_{cp}) определяли из выражения

$$K_{cp} = \left(R_{из} + \frac{1}{\alpha_{гр}} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где $R_{из}$ – тепловое сопротивление изоляционного покрытия газопровода, м²·К/Вт;

$\alpha_{гр}$ – коэффициент теплоотдачи от газопровода в грунт, Вт/(м²·К).

Схема газопровода-отвода с двумя ЛУР показана на рисунке 3.



1 – магистральный газопровод; 2 – газопровод-отвод; 3 – линейный узел редуцирования № 1; 4 – узел редуцирования № 2; 5 – ГРС; 6 – подогреватели ГРС; 7 – регуляторы ГРС; 8 – газ низкого давления
Рисунок 3 – Расчетная схема газопровода-отвода, оснащенного двумя линейными узлами редуцирования (а), график изменения давления в газопровode-отводе (б)

Расчеты термобарических режимов в методе каскадного понижения давления выполнены на два режима работы газопровода-отвода: с подачей газа из МГ с давлением 5,4 МПа и МГ с давлением 7,5 МПа (таблица 1).

Таблица 1 – Термобарические режимы газопровода-отвода, с линейными узлами редуцирования

Давление* МГ	Точки измерения							
	Выход ЛУР №1		Вход ЛУР №2		Выход ЛУР №2		Вход ГРС	
	Давление*	Темп.	Давление	Темп.	Давление	Темп.	Давление	Темп.
5,4	4,2	6,5	3,6	1,9	1,3	-7,8	1,3	1,8
7,5	4,5	11,6	4,0	1,9	1,3	-7,5	1,3	1,8

*Давление, МПа, температура, °С.

При снижении давления в ЛУР №1 с 5,4 МПа (7,5 МПа) до 4,2 – 4,5 МПа, за счет эффекта дросселирования, температура газа уменьшалась с 20 °С до 6,5 – 11,6 °С. Далее газ охлаждался за счет теплообмена с грунтом и адиабатического расширения, в результате чего его температура на входе в ЛУР № 2 составила 1,9 °С. При снижении давления газа в ЛУР № 2 до 1,3 МПа, его температура составляла минус 7,5 – 7,8 °С, после чего следовал нагрев за счет тепло-

вого взаимодействия с грунтом. Температура газа на входе в ГРС соответствовала температуре грунта 1,8 °С. Данный режим работы газопровода-отвода является не оптимальным по причине значительного охлаждения газа на выходе ЛУР № 2.

Снижение интенсивности охлаждения газа может быть достигнуто за счет увеличения разности давлений на входе и выходе ЛУР № 1. При снижении давления газа в ЛУР № 1 до 2,5 МПа его температура составит 1,0 – 2,0 °С по всему участку газопровода-отвода между ЛУР № 1 и ЛУР № 2.

При снижении давления в ЛУР № 2 до 1,6 МПа температура газа снизится до минус 1,0 – минус 1,5 °С. На входе в ГРС температура газа достигнет стабильно положительных значений. При этом указанный температурный режим менее критичен в части развития негативных процессов, проявляющихся при трубопроводной транспортировке газа с более глубоким охлаждением.

Результаты расчета температурного режима газа на выходе ЛУР № 2, в зависимости от разности давлений на его входе и выходе, показаны на рисунке 4.

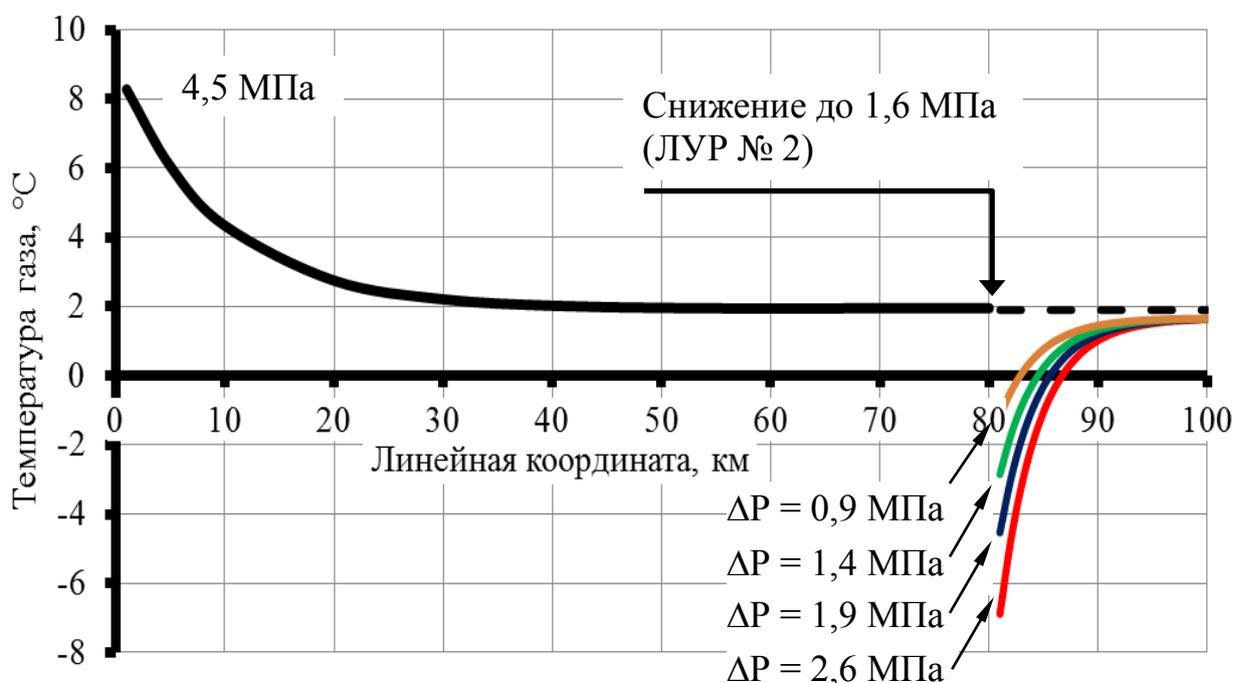


Рисунок 4 – Расчетный температурный режим газа, транспортируемого по газопроводу-отводу к ГРС в режиме каскадного двухступенчатого понижения давления (ΔP – разность давлений на входе и выходе ЛУР № 2)

В ходе оценки экономии топливного газа, расходуемого подогревателями ГРС при реализации технологии каскадного понижения давления, рассматривались следующие варианты работы ГРС:

- давление и температура газа на выходе ГРС, соответственно, 0,6 МПа, 2 °С, расход газа (приведенный к нормальным условиям) – 150000 м³/ч;
- давление на входе в ГРС 4,5; 3,5; 3,0 и 2,5 МПа, температура газа 2 °С.

Температуру газа на выходе ЛУР (T₂) определяли из выражения

$$T_2 = T_1 - (P_1 - P_2) \cdot D_i, \quad (4)$$

где T_1, P_1 – температура (К) и давление (МПа) газа на входе в ЛУР или узел редуцирования на ГРС;

P_2 – давление газа на выходе ЛУР или узла редуцирования ГРС, МПа;

D_i – коэффициент Джоуля-Томпсона для природного газа, К/МПа.

Количество тепловой энергии, необходимой для нагрева суточного объема поставляемого ГРС газа, определяли из выражения

$$Q = C_p \cdot m \cdot (T_1 - T_2), \quad (5)$$

где m – масса газа, подаваемого ГРС за сутки, кг;

T_1 – температура газа на выходе ГРС, °С;

T_2 – температура газа на выходе узла редуцирования ГРС (без предварительного подогрева), °С;

C_p – средняя изобарная теплоемкость газа, Дж/(кг·°С).

Расход топливного газа (м³) на ГРС определяли из выражения

$$q_T = \frac{Q}{\eta \cdot g}, \quad (6)$$

где η – коэффициент полезного действия подогревателя газа на ГРС в относительных единицах;

g – минимальная теплотворная способность газа, Дж/м³.

Результаты расчетной оценки расхода топливного газа в подогревателях ГРС приведены в таблице 2. В результате расчета установлено, что экономия топливного газа в сутки при реализации технологии каскадного понижения давления газа в газопроводе-отводе составит:

– 1126,3 м³ при давлении газа на входе в ГРС 2,5 МПа;

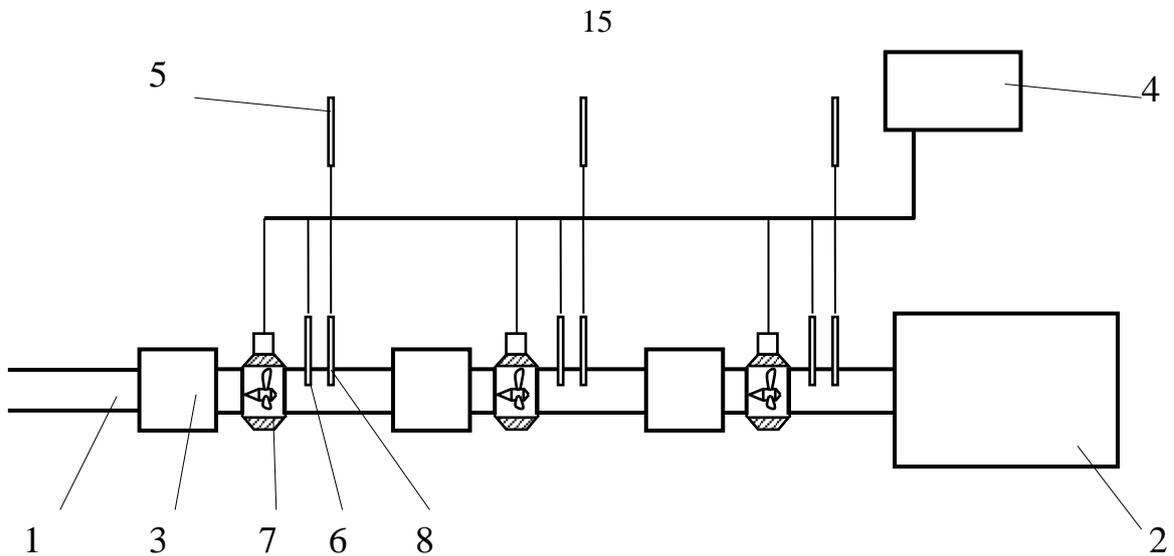
– 847,8 м³ при давлении газа на входе в ГРС 3,0 МПа.

Таблица 2 – Результаты расчетной оценки расхода топливного газа в подогревателях ГРС

Давление на входе в ГРС, МПа	Температура газа после редуцирования на ГРС (без подогрева), °С	Расход тепловой энергии для подогрева газа перед редуцированием на ГРС, ГДж	Расход топливного газа в подогревателях ГРС, м ³ /сут
4,5	минус 15,3	92	2532,10
3,5	минус 11,4	71	1964,22
3,0	минус 9,5	61	1688,30
2,5	минус 7,6	54	1405,80

На основании полученных расчетных данных, характеризующих разные варианты применения разрабатываемого метода, наиболее рациональной является следующая технологическая схема каскадного понижения давления в газопроводе-отводе.

Первый узел редуцирования размещается на входе в газопровод-отвод, второй и все последующие узлы редуцирования размещаются вдоль газопровода с заданным шагом, определяемым по результатам тепловых расчетов (рисунок 5).



1 – газопровод; 2 – ГРС; 3 – узел редуцирования; 4 – цифровой блок управления; 5 – датчик температуры грунта; 6 – датчик давления; 7 – расходомер; 8 – датчик температуры газа

Рисунок 5 – Схема газопровода-отвода с линейными узлами редуцирования

На первом узле снижения давления газа (3) давление газа понижают на величину, определяемую из условия

$$P_2 = P_1 - \frac{(T_1 - 0,1)}{D_i}, \quad (7)$$

где P_1, T_1 – давление и температура газа на входе в ЛУР № 1, МПа;
 P_2 – допустимое давление газа на выходе ЛУР № 1, МПа;
 D_i – коэффициент Джоуля-Томпсона, °С/МПа.

Далее газ с пониженным давлением направляется к следующему ЛУР, при этом его температура за счет естественного теплообмена повышается до температуры грунта. На втором и последующих ЛУР давление газа понижается на величину, определяемую из условия

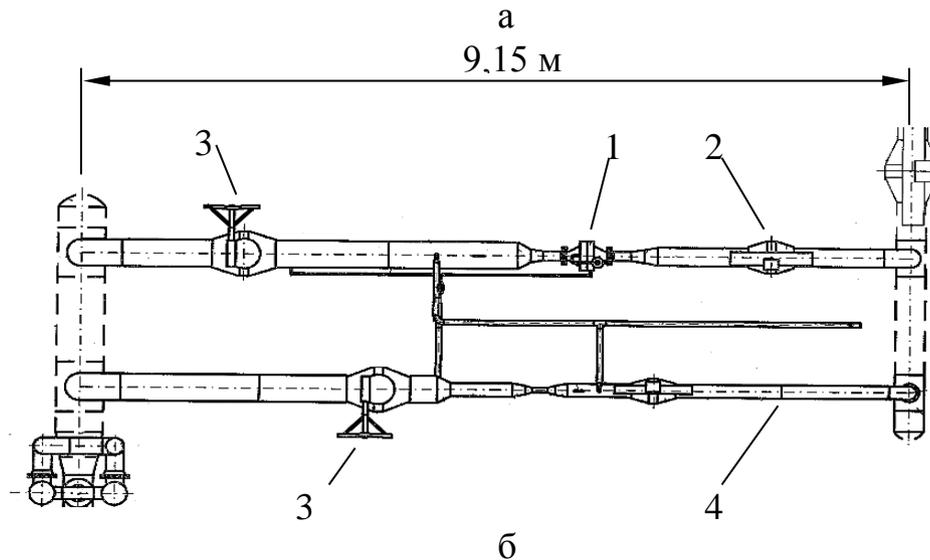
$$P_{j+1} = P_j - \frac{(T_{rj} - 0,1)}{D_i} \quad (8)$$

где P_j, T_{rj} – давление и температура газа на входе во второй и все последующие ЛУР, МПа;

P_{j+1} – допустимое давление газа на выходе во второй и все последующие ЛУР, МПа.

На входе в ГРС газ также имеет температуру, соответствующую температуре грунта, при этом за счет уменьшения разности давлений газа на входе и выходе ГРС охлаждение газа будет менее интенсивным, чем в случае реализации стандартной технологии, предполагающей, что понижение давления газа осуществляется только на ГРС. В результате, расход топливного газа, используемого в подогревателях ГРС, значительно снижается.

В третьей главе выполнена опытно-промышленная апробация метода каскадного понижения давления газа в газопровode-отводе к ГРС. Разработан, изготовлен и смонтирован на газопровode-отводе экспериментальный ЛУР газа (рисунок 6). Опытно-промышленная апробация технологии каскадного понижения давления газа в газопровode подклочении ГРС выполнена в несколько этапов в 2019, 2021, 2022 и 2023 гг.



- 1 – клапан-регулятор РДУ-64-100; 2 – кран с механизированным приводом;
3 – кран с ручным управлением; 4 – линия постоянного расхода

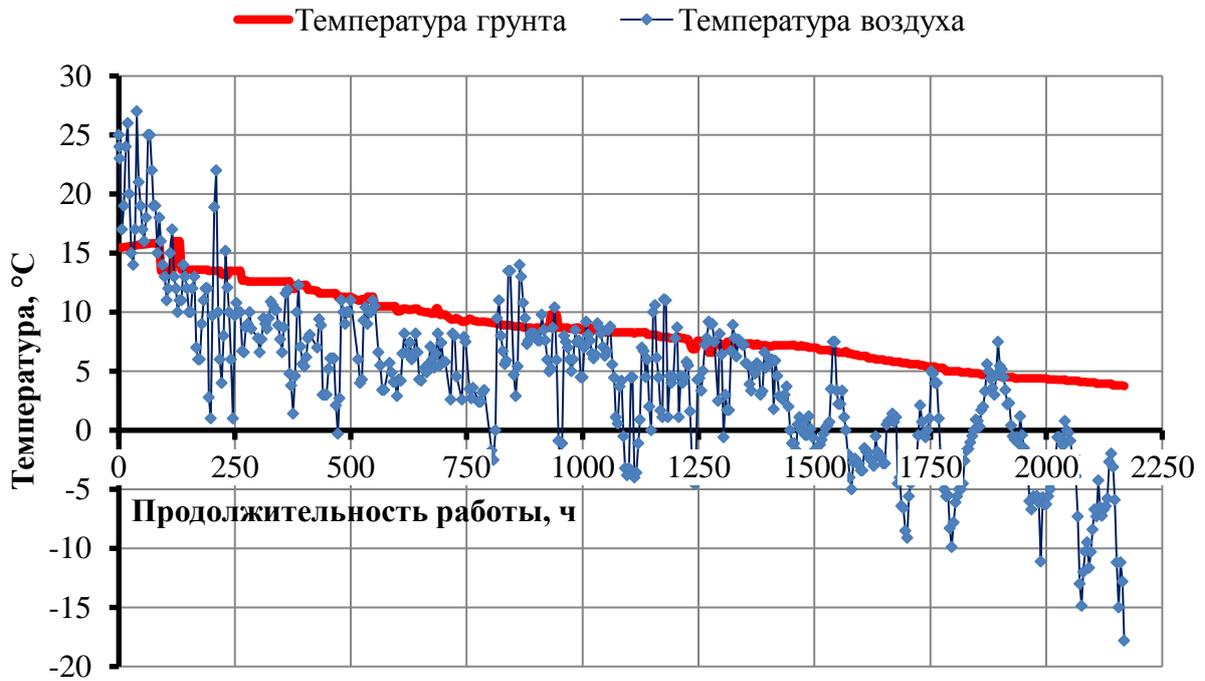
Рисунок 6 – Линейный узел редуцирования:

а) чертеж, вид сверху; б) общий вид

В ходе опытно-промышленной апробации технологии каскадного понижения давления выполнялся контроль следующих показателей:

- температуры и давления газа на входе и выходе первого и второго ЛУР, а также газораспределительных станций, выполняющих отбор газа из газопровода-подключения ГРС «Сыктывкар»;
- температуры воздуха;
- температуры грунта в месте размещения ЛУР (второго);
- температуры поверхности газопровода подключения с помощью датчиков температуры, смонтированных на поверхности трубы, расположенных с шагом 500 м от точки размещения ЛУР (второго) на дистанции 6 км.

Интерес представляют графики изменения во времени температур, например, на втором этапе испытаний (рисунок 7).



б

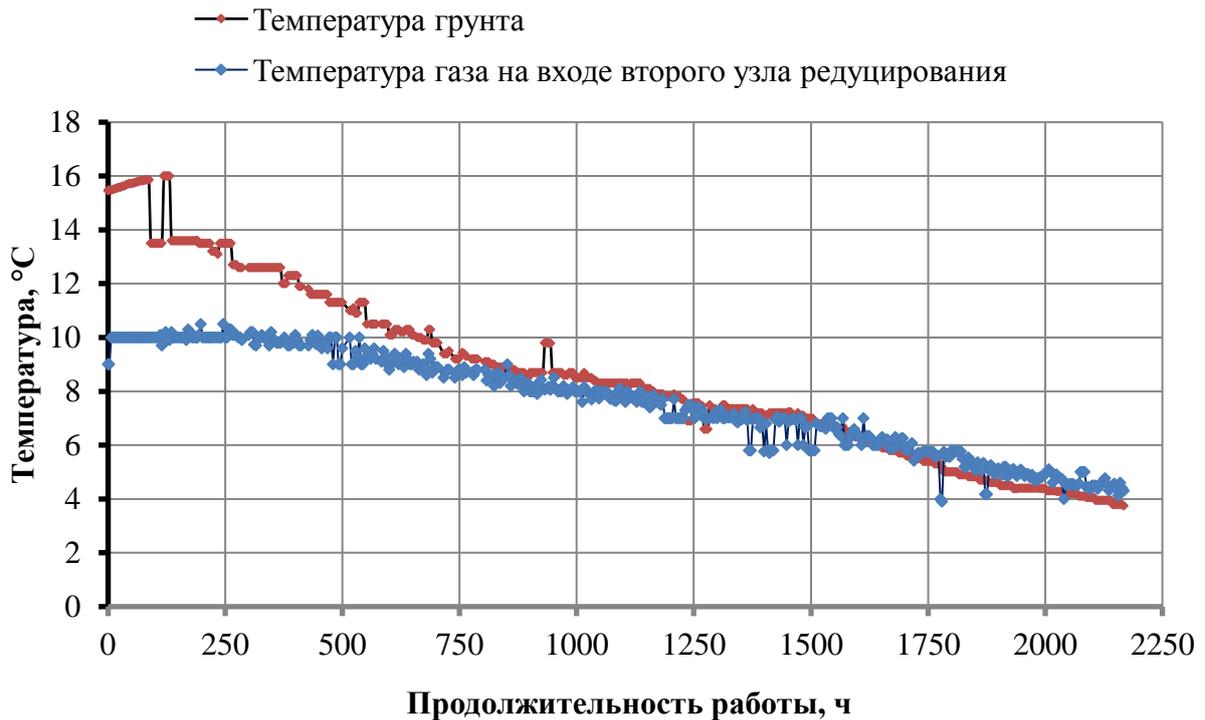


Рисунок 7 – Температура воздуха и грунта (а), температура грунта и газа на входе ЛУР № 2 (2021 г.) (б)

Данные соответствуют испытаниям, выполненным в 2021 г. в период с середины августа по середину декабря, продолжительность работы ЛУР 90 сут. Температура грунта снижалась с 15,0 до 4,0 °С, температура воздуха на период завершения испытаний составила минус 15 °С. Температура газа на входе в ЛУР № 2 примерно до периода 750 сут имела расхождение во временном тренде, а с указанного периода наблюдается синхронное изменение температур грунта и газа, что определяется установившимся процессом теплообмена.

В результате проведенной многоэтапной опытно-промышленной апробации технологии каскадного снижения давления газа в газопроводе-отводе было установлено следующее:

– подтверждена энергоэффективность метода транспортировки газа с последовательным каскадным снижением давления, в ряде этапов опробования на ГРС «Сыктывкар» и ГРС «Верхний Чов» была исключена процедура подогрева газа (экономия топливного газа 100 %);

– подтверждена работоспособность экспериментального ЛУР.

Результаты расчетно-экспериментальной оценки экономии топливного газа, используемого для подогрева газа на ГРС «Эжва» за счет подачи газа в газопровод-отвод при пониженном давлении (3,0 МПа) (четвертый этап испытаний, 2023 г.) показаны на рисунке 8. Допустимая температура газа на выходе ГРС «Эжва» составляла минус 2 °С.

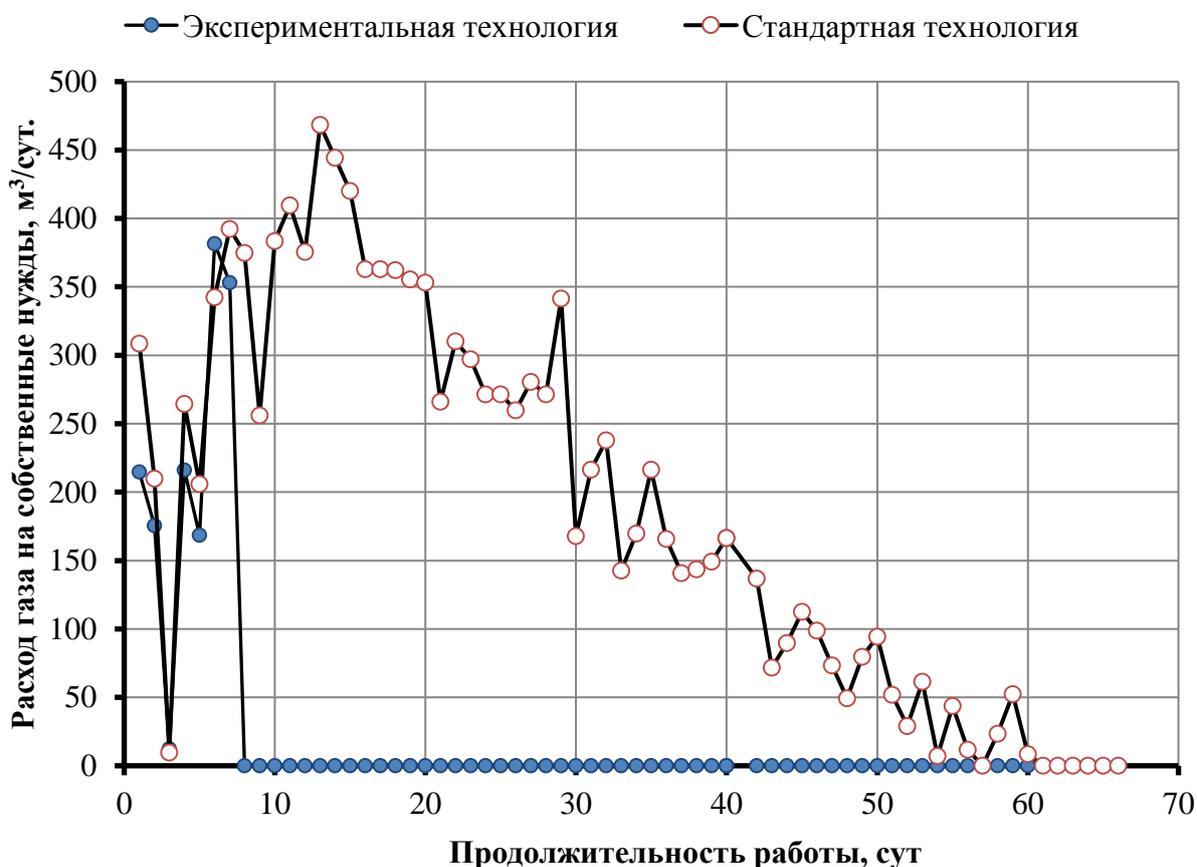


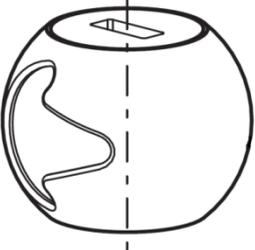
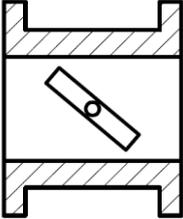
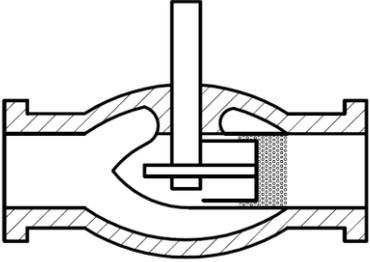
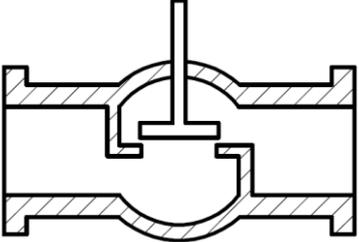
Рисунок 8 – Потребление газа на собственные нужды ГРС «Эжва» при опытно-промышленной апробации технологии каскадного понижения давления газа в газопроводе-подключении (2023 г.)

Общее потребление газа на ГРС «Эжва» на собственные нужды в период проведения испытаний (в течение 66 сут) составило 1,52 тыс. м³. При реализации стандартной технологии расход газа на собственные нужды составлял 12,41 тыс. м³. В результате реализации экспериментальной технологии экономия топливного газа составила 88 %.

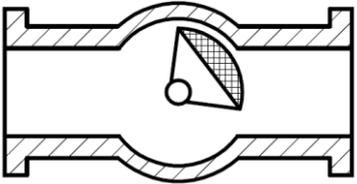
В четвертой главе выполнена разработка конструкции устройства регулирования расхода и давления в составе ЛУР.

Выполнен анализ конструктивного устройства и опыта эксплуатации различных видов регулирующих устройств, используемых для регулирования давления и расхода газа в магистральных и технологических газопроводах, а также в газораспределительных сетях. Введена классификация запорно-регулирующей арматуры, являющаяся одним из видов регулирующих устройств (таблица 3).

Таблица 3 – Классификация запорно-регулирующей арматуры

Тип запорно-регулирующего узла	Схема	Ограничения
Шар с каналом специальной формы		<ol style="list-style-type: none"> 1. Частичное перекрытие канала при переводе запорно-регулирующего узла в положение «открыто»; 2. Ограничение ресурса вследствие износа уплотнений; 3. Значительные геометрические размеры
Поворотный диск		<ol style="list-style-type: none"> 1. Частичное перекрытие канала при переводе запорно-регулирующего узла в положение «открыто»; 2. Несовершенство геометрической формы участка перепуска
Перфорированная втулка и поршень с осевым ходом		<ol style="list-style-type: none"> 1. Перекрытие канала при переводе запорно-регулирующего узла в положение «открыто»; 2. Повышенный износ боковой поверхности поршня; 3. Повышенная повреждаемость в условиях переохлаждения, а также при наличии в рабочей среде загрязнений
Тарельчатый клапан с ходом в направлении, перпендикулярном оси потока		<ol style="list-style-type: none"> 1. Частичное перекрытие канала при переводе запорно-регулирующего узла в положение «открыто»; 2. Несовершенство геометрической формы участка перепуска

Продолжение таблицы 3

Тип запорно-регулирующего узла	Схема	Ограничения
Поворотный сегмент		1. Большинство изделий не предназначено для работы при высоком давлении транспортируемой среды; 2. Несовершенство геометрической формы участка перепуска

В результате проведенного анализа основных схем исполнения установлены следующие ее недостатки:

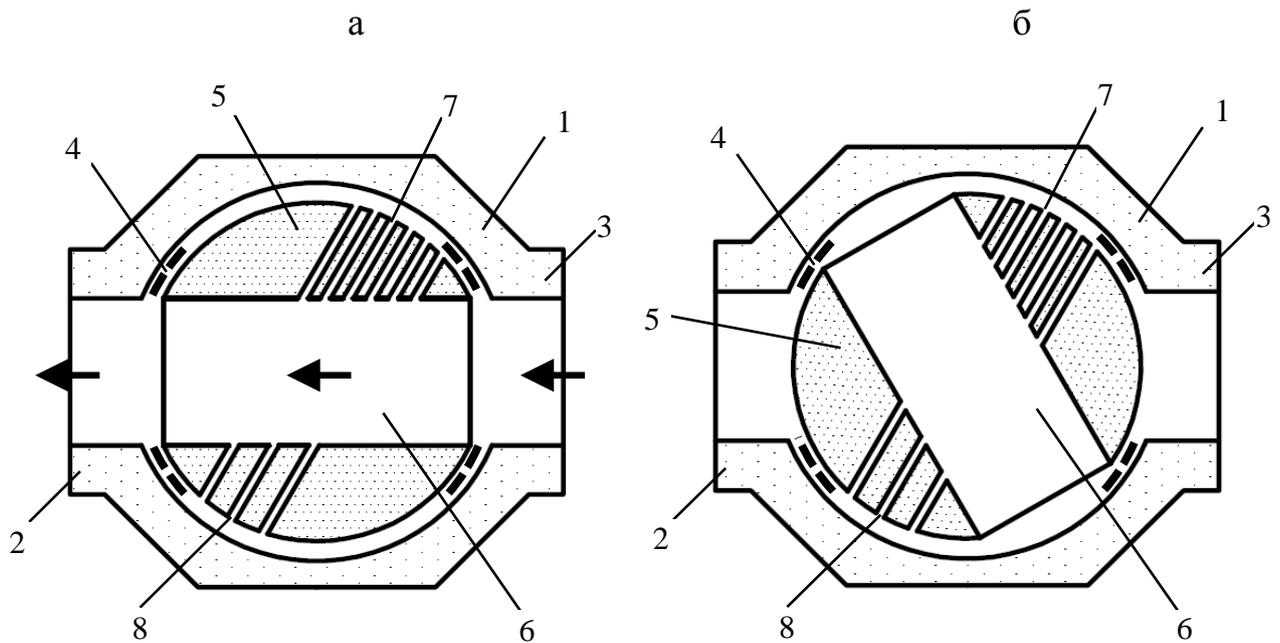
- ключевым недостатком применяемых схем регулирования (кроме устройств с поворотным сегментом) является постоянное частичное перекрытие перепускного канала с соответствующим снижением эффективной площади перепуска при переводе запорно-регулирующих узлов в положение «открыто»;

- при использовании в качестве линейных узлов дросселирования в составе трубопроводов-подключений, указанные устройства потребуют обустройства специальной трубопроводной обвязки с дополнительной запорной арматурой вследствие невозможности организации пропуска внутритрубных средств диагностики (устройства следует размещать в байпасной линии, обеспечивающей перепуск газа в обход, например, шарового крана, переведенного в положение «закрыто»). Использование устройств с сегментным запорно-регулирующим узлом ограничено вследствие заявленного производителями малого рабочего давления.

Для устранения недостатков известных устройств разработан запорно-регулирующий шаровой кран, содержащий корпус (рисунок 9) с входным и выходным патрубками, уплотнительными элементами и шаровым запорно-регулирующим поворотным узлом, содержащим:

- один цилиндрический перепускной канал, диаметр которого соответствует внутреннему диаметру трубопровода;

- параллельные цилиндрические впускные и выпускные каналы малого диаметра, ось которых повернута в плоскости вращения шарового поворотного узла относительно оси перепускного канала на 60° , соединяющие наружную поверхность шарового поворотного узла и полость перепускного канала.



1 – корпус; 2, 3 – входной и выходной патрубки; 4 – уплотнение;
 5 – запорно-регулирующий узел; 6 – перепускной канал;
 7, 8 – впускные и выпускные каналы малого диаметра
 Рисунок 9 – Кран шаровый запорно-регулирующий:
 а) положение запорно-регулирующего узла в режиме
 максимальной пропускной способности (положение «открыто»);
 б) положение запорно-регулирующего узла в режиме «закрыто»

Основные выводы

1. Определены недостатки и ограничения стандартной технологии предварительного нагрева газа на ГРС, определен перечень отказов и нарушений, возникающих при нарушении температурных режимов транспортировки газа. Предложен новый научный подход к энергосбережению при трубопроводной транспортировке природного газа по газопроводам-отводам, обеспечивающий уменьшение объемов генерации тепловой энергии для нагрева газа перед узлом редуцирования ГРС за счет использования тепловой энергии, возникающей попутно при компримировании газа на компрессорных станциях, а также за счет использования геотермальной энергии грунта.

2. Разработан новый метод каскадного понижения давления газа в газопроводах-отводах, предполагающий использование последовательно расположенных ЛУР, распределенных вдоль газопровода. Получены расчетные выражения для определения оптимальной величины перепада давления транспортируемого газа на каждом ЛУР с учетом параметров расхода, давления и температуры газа, температуры грунта, температуры воздуха.

3. Разработан опытно-промышленный образец ЛУР. Выполнена практическая апробация нового метода каскадного понижения давления газа на действующем газопроводе-отводе Микунь – Сыктывкар с изготовлением, монтажом и опытно-промышленным опробованием двух линейных узлов регуляторов давления газа. При опытно-промышленной апробации метода каскадного

снижения давления транспортируемого газа достигнуто сокращение потребления топливного газа на ГРС на 88 %.

4. Разработана новая перспективная конструкция линейного запорно-регулирующего устройства, включающая спрофилированные каналы в шаровом запирающем органе и обеспечивающая перепуск газа с заданным перепадом давления и полно проходным сечением. Получен сопутствующий практический эффект от реализации метода каскадного снижения давления транспортируемого газа, заключающийся в повышении безопасности эксплуатации газопровода-отвода за счет уменьшения воздействия на промышленную и гражданскую инфраструктуру повреждающих факторов, в случае потенциально возможного аварийного разрушения газопровода.

**Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах:**

– в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Янчук В.М. Повышение эффективности теплообменников подогревателей газа газораспределительной станции за счет использования труб с внутренним оребрением / В.М. Янчук, И.В. Шишкин, П.А. Кузьбожев, А.В. Сальников // Вести газовой науки. – 2020. – Спецвыпуск (43). – С. 87 – 92. Журнал категории К1.

2. Янчук В.М. Определение тепловых потерь подогревателя газа газораспределительной станции с промежуточным теплоносителем / И.В. Шишкин, С.А. Шкулов, Д.В. Федотов, П.А. Кузьбожев, А.В. Сальников // Вести газовой науки. – 2020. – Спецвыпуск (43). – С. 93 – 97. Журнал категории К1.

3. Янчук В.М. Перспективные направления совершенствования систем подогрева газа на ГРС / А.С. Кузьбожев, И.Н. Бирилло, И.В. Шишкин, С.А. Шкулов, П.А. Кузьбожев // Газовая промышленность. – 2022. – № 6 (834). – С. 52 – 58. Журнал категории К2.

4. Янчук В.М. Методы снижения тепловых потерь при транспортировке газа по протяженным газопроводам-отводам / А.С. Кузьбожев, И.В. Шишкин, И.Н. Бирилло, П.А. Кузьбожев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2023. – № 3. – С. 95 – 106. Журнал категории К3.

5. Янчук В.М. Разработка технологии каскадного понижения давления газа в протяженных газопроводах-отводах газораспределительных станций / А.С. Кузьбожев, И.В. Шишкин, И.Н. Бирилло, П.А. Кузьбожев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2023. – № 4. – С. 63 – 74. Журнал категории К3.

– в остальных изданиях

6. Янчук В.М., Кузьбожев П.А., Сальников А.В. Направления конструктивно-технологического совершенствования систем подогрева газа газораспределительных станций // Материалы Международной конференции «Рассохинские чтения» / под редакцией Р.В. Агинеи. В 2 ч. Ч. 1. – Ухта: УГТУ, 2020. – С. 123 – 128.

7. Кузьбожев П.А., Шишкин И.В., Янчук В.М. Перспективы совершенствования узлов подогрева газа на газораспределительных станциях // Материалы XXI Международной молодежн. научн. конференции «Севергеозкотех-2020». В 2 ч. Ч. 2. – Ухта: УГТУ, 2020. – С. 105 – 109.

8. Янчук В.М., Шишкин И.В., Кузьбожев П.А. Расчетное моделирование охлаждения высокоскоростного потока сжатого газа через проточную часть несимметричного клапана-регулятора на газораспределительных станциях // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений и транспорта трудноизвлекаемых запасов углеводородов» / под редакцией Р.В. Агиней. – Ухта: УГТУ, 2020. – С. 292 – 295.

9. Янчук В.М., Шишкин И.В., Кузьбожев П.А. Предложения по применению утилизаторов тепла продуктов сгорания в теплообменном оборудовании газораспределительных станций // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений и транспорта трудноизвлекаемых запасов углеводородов» / под редакцией Р.В. Агиней. – Ухта: УГТУ, 2020. – С. 296 – 299.

10. Янчук В.М., Кузьбожев П.А., Сальников А.В. Пути совершенствования систем подогрева газа на газораспределительных станциях // Нефтегазовый терминал. Выпуск 19: материалы Международной научно-технической конференции имени профессора Н.А. Малюшина / под ред. С.Ю. Подорожникова. – Тюмень: 2021. – С. 465 – 473.

11. Янчук В.М., Кузьбожев П.А., Сальников А.В. Разработка принципиальных конструктивных решений для повышения эффективности подогревателей газа газораспределительных станций с промежуточным теплоносителем // Нефтегазовый терминал. Выпуск 19: материалы Международной научно-технической конференции имени профессора Н.А. Малюшина / под общ. ред. С. Ю. Подорожникова. – Тюмень: 2021. – С. 473 – 478.

12. Янчук В.М., Кузьбожев П.А., Сальников А.В. Направления совершенствования подогревателей газа модульной конструкции // Нефтегазовый терминал. Выпуск 19: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции имени профессора Н.А. Малюшина / под общ. ред. М.А. Александрова. – 2021. – С. 479 – 483.

13. Янчук В.М. Совершенствование методологии оценки тепловых потерь подогревателей газа на ГРС / А.С. Кузьбожев, И.Н. Бирилло, И.В. Шишкин, П.А. Кузьбожев, С.А. Шкулов // Материалы Международной конференции «Рассохинские чтения» / под редакцией Р.В. Агиней. В 3 ч. Ч. 2. – Ухта: УГТУ, 2021. – С. 152 – 154.

14. Янчук В.М. Опыт применения тепловизионного метода контроля на подогревателях газа ГРС / А.С. Кузьбожев, И.Н. Бирилло, И.В. Шишкин, П.А. Кузьбожев, С.А. Шкулов // Материалы Международной конференции «Рассохинские чтения» / под редакцией Р.В. Агиней. В 3 ч. Ч. 2. – Ухта: УГТУ, 2021. – С. 154 – 157.

15. Янчук В.М. Расчетная оценка потенциала энергосбережения на подогревателе газа газораспределительной станции / А.С. Кузьбожев, И.В. Шишкин,

П.А. Кузьбожев // Трубопроводный транспорт – 2021: В сб. тез. докл. XVI Международной учебно-научно-практической конференции (17 – 18 ноября 2021 г.). – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2021. – С. 362 – 363.

16. Янчук В.М. Оптимизация режимов работы подогревателей газа ПТПГ-30 / А.С. Кузьбожев, И.Н. Бирилло, И.В. Шишкин, П.А. Кузьбожев // Материалы Международной конференции «Рассохинские чтения» (3 – 4 февраля 2022 г.) / под редакцией Р.В. Агиней. – Ухта: УГТУ, 2022. – С. 419 – 423.

17. Янчук В.М. Определение гидравлических потерь высокоскоростных потоков газа в трубопроводах газораспределительных станций / А.С. Кузьбожев, И.Н. Бирилло, И.В. Шишкин // Материалы Международной конференции «Рассохинские чтения» (2 – 3 февраля 2023 г.) / под редакцией Р.В. Агиней. – Ухта: УГТУ, 2023. – С. 314 – 318.