

На правах рукописи



ПАРФЕНОВ ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ НАГРЕВА ЭЛЕМЕНТОВ КРАНОВЫХ
УЗЛОВ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ГАЗОМ УЧАСТКОВ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2018

Диссертация выполнена в
Ухтинском государственном техническом университете на кафедре
«Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов»
и в АО «Гипрогазцентр»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
заместитель генерального директора
по науке АО «Гипрогазцентр»,
Агиней Руслан Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
начальника отдела аттестации трубопрово-
дов АО «Транснефть Север»,
Китаев Сергей Владимирович

кандидат технических наук,
заместителя генерального директора ООО
«Стройгаз консалтинг»,
Алиев Тимур Томасович

Ведущая организация: общество с ограниченной ответственностью
«Газпром ВНИИГАЗ»

Защита состоится 14 декабря 2018 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, д. 13.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», а также на сайте вуза по адресу www.ugtu.net в разделе «Наука→Диссертации».

Автореферат разослан 31 октября 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Д. А. Борейко

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Большая часть газотранспортной системы Российской Федерации введена в эксплуатацию более 20 лет назад, в связи с чем, на текущий момент существует необходимость проведения ремонтно-восстановительных работ. Перед проведением указанных работ производится стравливание газа из объема межкранового участка газопровода, затем – заполнение отремонтированного участка газопровода. Процедура заполнения производится и при вводе в эксплуатацию вновь построенного газопровода.

Заполнение участка магистрального газопровода (МГ) производится с использованием байпасной линии обвязки кранового узла (КУ). Порядок технологических операций при заполнении участков газопровода и скорость заполнения регламентированы различными документами: СТО Газпром 2-3.5-454-2010, СТО 453045-00159025-150004-2009 Стандарт организации ООО «Газпром трансгаз Ухта», СНиП III-42-80*, СП 86.13330.2012 «Магистральные трубопроводы» и др.

Опыт эксплуатации показывает, что даже при соблюдении требований нормативной документации может возникать нештатная ситуация – разогрев элементов обвязки КУ до аварийноопасной температуры, сопровождающийся оплавлением изоляции, нарушением герметичности запорной арматуры (ЗА) и прочими разрушениями. В результате возникает необходимость повторного ремонта. Проявление указанного эффекта усиливается в случае проведения мероприятий, увеличивающих скорость заполнения участков газопровода. В то же время, существует необходимость повышения скорости заполнения газопроводов с целью уменьшения времени ввода в эксплуатацию газопровода, что, в свою очередь, повышает характеристику надежности газопровода (увеличивается коэффициент готовности) и экономические характеристики газопровода в целом.

Степень разработанности темы исследования. Данная работа затрагивает области классической динамики МГ, нелинейной газодинамики, в том числе, связанной с эффектом Гартмана – Шпренгера.

Классические труды по газовой динамике МГ принадлежат таким ученым, как Н.Е. Жуковский, И.А. Чарный, И.П. Гинзбург, Л.Г. Лойцянский и пр.

Вопросам моделирования сложных динамических движений газа посвящены работы М.В. Лурье, А.В. Некляева, М.А. Гусейнзаде, Р.Г. Галиуллина, К. Флетчера, П. Г. Фрика, D. C. Wilcox, P. Пейре, F. Menter, L. Davidson.

Существенный вклад в исследования разогрева газа, вызванного эффектом Гартмана – Шпренгера внесли: А.Я. Черкез, Ю.Б. Елисеев, В.М. Купцов, Дж.В. Стретт, W. Chester, E. Brocher, H. Sprenger, B.R. Phillips, J. Hartmann.

Отмеченные случаи разогрева тупиковых полостей элементов обвязки крановых узлов не объяснены; не разработаны критерии возникновения и происхождения данного эффекта.

Таким образом, возникает актуальная научно-техническая задача совершенствования проектных решений и разработки мероприятий при эксплуатации крановых узлов, обеспечивающих безопасность процесса заполнения участков газопроводов. При этом требуются дополнительные теоретические и

экспериментальные исследования процессов движения газа в обвязке КУ в момент заполнения участка газопровода.

Цель работы – Разработка мероприятий по предотвращению разогрева тупиковых полостей в трубопроводной обвязке кранового узла на стадии их проектирования и эксплуатации.

Задачи исследования:

1. Построить трехмерную компьютерную модель динамического движения газа в обвязке КУ, на которой провести ряд вычислительных экспериментов, замещающих дорогостоящие натурные исследования, с целью определения критериев и условий возникновения эффекта Гартмана – Шпренгера. Изучить способы его предотвращения.

2. Обосновать и выбрать объект исследования, разработать методику проведения эксперимента, произвести замеры параметров процесса в экспериментах, проанализировать результаты произведенных экспериментальных исследований, верифицировать результаты компьютерного моделирования.

3. Разработать и внедрить практические рекомендации, позволяющие избегать разогрева в элементах КУ в течение всего жизненного цикла объекта – усовершенствовать существующие проектные решения; разработать мероприятия, реализуемые при эксплуатации КУ, включая алгоритм определения рационального решения с учетом практической возможности проведения данных мероприятий.

Соответствие паспорту специальности. Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», а именно областям исследования п.2 «Разработка и оптимизация методов проектирования, сооружения и эксплуатации сухопутных и морских нефтегазопроводов, нефтебаз и газонефтехранилищ с целью усовершенствования технологических процессов с учетом требований промышленной экологии» и п.6 «Разработка и усовершенствование методов эксплуатации и технической диагностики оборудования насосных и компрессорных станций, линейной части трубопроводов и методов защиты их от коррозии».

Научная новизна:

1. Построена аналитическая модель движения газа в байпасной линии при заполнении участков магистрального газопровода.

2. Установлены критерии возникновения в трубопроводной обвязке кранового узла эффекта Гартмана – Шпренгера нагрева тупиковой полости, включая скорость движения газа и геометрические характеристики трубопроводов и соединительных деталей.

3. Установлено, что амплитуда пульсаций температуры в тупиковой полости линейно возрастает с ростом давления основного потока.

В то же время зависимости скорости роста температуры газа и амплитуды пульсации давления от абсолютного (среднего) давления основного потока газа имеют следующий характер:

$$\begin{cases} y = k_1 x + b_1, \text{ для } x < x_{\text{крит}} (k_1 > 0) \\ y = k_2 x + b_2, \text{ для } x > x_{\text{крит}} (k_2 < 0) \end{cases}$$

В рассмотренных вариантах точка критического давления 2,3÷2,6 МПа.

4. Установлены зависимости амплитуды пульсации давления и температуры, скорости роста температуры газа от относительной глубины полости (относительная глубина равна отношению глубины к диаметру полости, $l_T = L_T/D$). Относительная глубина полости в диапазоне $l_T = 30 \div 35$ соответствует максимальным значениям указанных величин.

(Для диаметра 50 мм, абсолютная длина составляет 1,50÷1,75 м, что близко к характерным размерам стояка отбора импульсного газа)

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработанные подходы к построению компьютерной модели, включающие в себя выбор уравнения состояния, модели турбулентности, схему построения конечно-элементной сетки, которая позволяет рассчитывать сложные газодинамические процессы, происходящие при нестационарных режимах движения газа, например, при заполнении участков трубопроводов, дросселировании газа на ГРС и др.

2. Практическая реализация алгоритма выбора технико-технологических решений для предотвращения возникновения эффекта Гартмана – Шпренгера с учетом жизненной стадии трубопровода, скорости движения газа по байпасной линии, геометрических характеристик трубопроводов и соединительных деталей, позволяет снизить риски разрушения элементов трубопровода и повысить надежность магистрального газопровода, путем достижения максимально допустимой скорости заполнения, обеспечивающей снижение времени введения в эксплуатацию и повышение коэффициента готовности газопровода.

Методология и методы исследования. Поставленные задачи решены с использованием экспериментального метода, при этом при проведении экспериментальной части исследования применялись абстрагирование, обобщение и идеализация. При проведении исследований применялись натурные исследования температуры поверхности трубопроводов, метрологический контроль давления в газопроводе. При проведении теоретического анализа использовались методы вычислительного эксперимента на компьютерной модели, реализующей набор математических моделей, определяющих поведение реального газа в конкретных условиях.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждается следующими аргументами:

- При построении аналитической модели использовались подходы классической гидромеханики; уравнения моделей, построенных классическими способами.
- При осуществлении компьютерного моделирования использовался современный программный комплекс, верифицированный в различных сферах науки и для различного класса задач. При построении компьютерной модели использовалась наиболее полная система уравнений Навье – Стокса, с учетом вязкого поведения реального газа, моделируемого уравнением Соав – Редлиха – Квонга, наилучшим образом подходящему к описанию углеводородных газов, а также с учетом обобщенной модели турбулентности Ментера переноса сдвиговых напряжений. Вычисления

производились с использованием многопроцессорной-ЭВМ, с задействованием для расчета до 96 процессорных ядер.

- Все результаты вычислительных экспериментов и аналитической модели были верифицированы экспериментальными исследованиями, проведенными на реальных работающих объектах.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: I,II Научно-практических конференциях молодых ученых и специалистов АО «Гипрогазцентр» «Актуальные вопросы проектирования объектов добычи и транспорта газа», (г.Н.Новгород ОАО «Гипрогазцентр» 2013 г., 2015 г.); 10,11 Всероссийских конференциях молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика)» (г.Москва РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина 2013 г., 2015 г.); II научно-практический семинар «Применение современных компьютерных технологий численного моделирования для решения задач минерально-сырьевого сектора» г. Санкт-Петербург СПГУ 2017 г.; Международная конференция «Рассохинские чтения» г. Ухта УГТУ 2017 г.; Международная научно-практическую конференция обучающихся, аспирантов и ученых «Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса» г. Нижневартовск ТИУ 2017 г.; VIII научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов г. Томск ООО «Газпром трансгаз Томск» 2017 г.; XVIII конкурс ПАО «Газпром» по компьютерному проектированию и информационным технологиям в 2017 году г. Санкт-Петербург НОУ «Газпром корпоративный институт»; XII Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2017» г. Уфа УГНТУ 2017 г.

Разработанные способы модификации технологических решений, улучшающие эксплуатацию КУ, внедрены при проведении ремонтно-восстановительных работ на «КУ Г-1 км 725» МГ «Ухта – Торжок 1» (1 нитка) и «КУ №877» МГ «Сахалин – Хабаровск – Владивосток», км 877.

При внедрении предложенных решений в рамках одной эксплуатирующей организации за 2017 год получен интегральный экономический эффект 4,74 млн. р.

Результаты работы внедрены при разработке отраслевого стандарта ПАО «Газпром» «Магистральный газопровод. Обязка технологического оборудования. Техничко-технологические и конструктивные решения».

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Раскрыты основные уравнения и методика моделирования движения газа в нелинейных условиях динамических процессов, происходящих со скоростями, близкими к скорости звука (число Маха $M \sim 0,8..1,0$) в обвязках КУ при заполнении участков МГ.

Изучены критерии проявления эффекта Гартмана-Шпренгера в трубопроводной обвязке КУ МГ.

Усовершенствованы проектные решения, применяемые при проектировании обвязки КУ МГ.

Разработаны способы предотвращения негативного явления на объектах повышенной опасности – МГ.

Создан универсальный алгоритм выбора рационального варианта в конкретных условиях, в зависимости от жизненной стадии изделия – КУ.

Практическая значимость работы определяется тем, что:

Разработан нормативно-технический документ «Магистральный газопровод. Обязка технологического оборудования. Техничко-технологические и конструктивные решения» (СТО Газпром, на момент подготовки данной работы находится на стадии согласования и введения в действие).

Разработано устройство, применяемое на существующих крановых узлах, позволяющее при минимальной модификации избежать проявления негативного эффекта (на устройство и его использование получен патент №2577896 (РФ) от 20.03.2016) . Изобретение вошло в список «100 лучших изобретений России» за 2016 год, утвержденный Приказом Роспатента №99 от 27.06.2017 г.

Определены алгоритмы и последовательность работы для сотрудников, непосредственно проводящих работы по заполнению участков магистральных газопроводов, позволяющие предотвращать возникновение опасного разогрева тупиковых полостей обвязки кранового узла.

Сведения о публикациях автора: по теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 3 – в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК, получен 1 патент РФ на изобретение-модель, подготовлена заявка на изобретение РФ «Способ предупреждения нагрева элементов трубной обвязки кранового узла при заполнении участков газопроводов».

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 182 страниц текста без приложений, 91 рисунков, 15 таблиц, список литературы из 91 наименований и одно приложение.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, изучении отечественных и зарубежных достижений в соответствующей области науки, проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, их апробации, подготовке публикаций по выполненной работе, оформлении патентных заявок, участии в разработке стандарта СТО Газпром.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, перечислены задачи исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлены сведения о научной новизне и практической значимости полученных результатов

В первой главе «**Устройство кранового узла магистрального газопровода, правила эксплуатации. Теплогидравлические процессы в обвязке кранового узла**» рассмотрено типовое устройство кранового узла, приведенное схематично на рисунке 1.

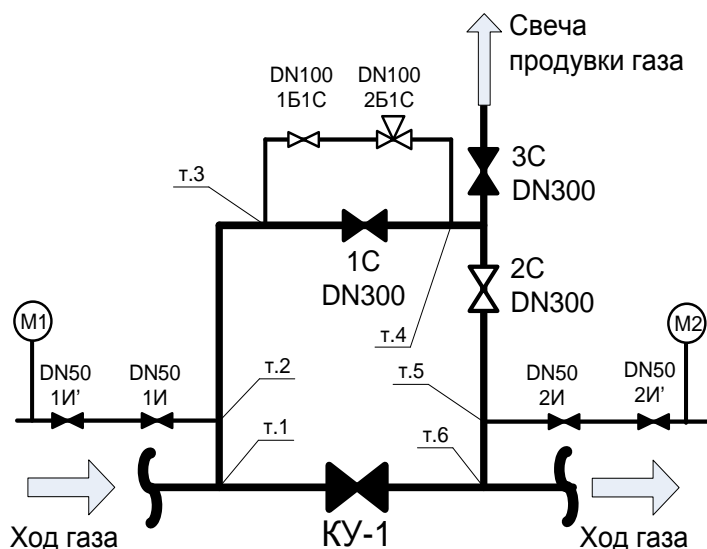


Рисунок 1. Схема КУ и положения ЗА в начальный момент заполнения МГ

ремонтно-восстановительных работ на действующем газопроводе.

Процесс заполнения участка МГ может осуществляться в соответствии с различными нормативными документами. В нормативных документах приводятся консервативные критерии скорости заполнения, для которых отмечается следующее:

- Большое время заполнения протяженных участков МГ, следовательно низкая его производительность и товаротранспортная работа.
- Имеются внутренние противоречия в нормативных документах. Так, например, указывается, что необходимо контролировать скорость роста давления, при этом не указывается точка, в которой необходимо осуществлять контроль.
- Правилами эксплуатации простым шаровым краном запрещено регулировать скорость заполнения, в случае отсутствия кранов-регуляторов.

В тоже время, эксплуатирующие организации стремятся повысить скорость заполнения участка МГ, со следующими целями:

1. Уменьшение времени простоя газопровода в связи со строительномонтажными или ремонтными работами, следовательно, увеличение времени работы, что влечет за собой повышение объема товаротранспортной работы.
2. Увеличение коэффициента готовности газопровода, т.е. повышение параметра надежности технически сложного объекта – МГ, за счет сокращения времени ввода в эксплуатацию участка МГ после ремонтных работ.

Практика эксплуатации КУ выявила, что, во-первых, выполнение критериев, сформулированных в нормативных документах, не позволяет быстро проводить заполнение. Во-вторых, в некоторых ситуациях, несмотря на то, что заполнение МГ осуществляется в соответствии с регламентами, происходит разогрев стояков отбора импульсного газа (ОИГ) со стороны заполняемого участка, а также части дополнительной байпасной линии DN100. Разогрев происходит до температур, нарушающих герметичность ЗА, оплавление наружной изоляции и пр. проявлений, т.е. создается пожароопасная ситуация на объекте повы-

Указывается, что в соответствии с нормативными документами байпасная обвязка (DN300) линейного крана осуществляется с устройством дополнительного байпаса (DN100).

Байпасные линии используются при заполнении прилегающего к КУ участка магистрального газопровода, производимого при вводе в эксплуатацию вновь построенного участка или повторном вводе в эксплуатацию участка после проведения

шенной опасности – газопроводе. С увеличением скорости заполнения участка, как правило, возрастает вероятность возникновения разогрева тупиковых полостей в обвязке КУ.

Эффект нагрева был зафиксирован в различных газотранспортных обществах на следующих газопроводах:

- ООО «Газпром трансгаз Ухта»: МГ «СРТО – Торжок», «Ухта – Торжок» II, «Ухта – Торжок» III, «СЕГ – 1», «СЕГ – 2», «Грязовец – Ленинград» 1, «Бованенково – Ухта» I;
- ООО «Газпром трансгаз Томск»: МГ «Сахалин – Хабаровск – Владивосток»;
- ООО «Газпром трансгаз Краснодар»: МГ «Джубга – Лазаревское – Сочи», «Голубой поток».

Анализ случаев проявления нагрева тупиковых полостей в рамках одного газотранспортного общества показывает, что нет зависимости частоты (количества) случаев данного эффекта ни от номинального диаметра, ни от времени эксплуатации газопровода, ни от рабочего давления газопровода.

Таким образом эффект разогрева носит массовый характер, не зависит от географического местоположения газопровода, эксплуатирующей организации и пр., т.е. проявление эффекта полностью обусловлено лишь физикой процесса.

Как правило, указанный разогрев элементов трубопроводной обвязки КУ вызывает замену негерметичной ЗА и связанными с этим затратами, понесенными на приобретение самой арматуры, сварочно-монтажными работами и стравливанием газа. Это приводит к дополнительным финансовым и временным затратам, загрязнению окружающей среды и срыву объемов поставок газа потребителю.

Основными процессами, способными изменять термодинамическое состояние газа, при его движении по обвязке КУ при заполнении участка МГ, являются:

- Истечение газа из сосуда с высоким давлением во внешнюю среду. Прохождение газа через дополнительную байпасную линию DN100 (возможно с не полностью открытым краном-регулятором 2Б1С) можно идеализированно представить как истечение газа из резервуара с высоким давлением в среду («атмосферу») с меньшим давлением. Подобная задача является классической и подробно исследована в различной литературе. При этом, в соответствии с перепадом давлений во внешней среде и в исходном объеме, определяется расход газа и соответствующая ему скорость движения газа. Существует предельная величина – критическая скорость, выше которой газ не может разогнаться без устройства дополнительных мероприятий (например, сопло специальной формы).
- Дросселирование газа – при расширении газа (дросселировании) для адиабатического процесса, т.е. без теплообмена с окружающей средой, происходит изменение температуры при изменении давления, в соответствии с формулой: $T_2 - T_1 = \int_{P_1}^{P_2} D_i dP$, где D_i – коэффициент Джоуля – Томпсона, T_i , p_i – температура газа и давление в начале/конце процесса, соответственно.

- Торможение газа для энергетически изолированного потока способно повышать температуру разогнанного потока, в соответствии с формулой: $T = T_0 + \frac{V_0^2}{2c_p}$, где V_0 – начальная скорость потока газа, c_p – теплоемкость газа при постоянном давлении.
- Эффект Гартмана – Шпренгера – явление, объясняющее разогрев газа в тупиковой полости выше температуры торможения набегающего потока газа. Данный эффект связан со срывным характером вихреобразования в окрестности входного сечения в тупиковую полость, вызывающим волны сжатия-разрежения. Данное явление широко известно, прежде всего, в области авиастроения, в то время как в газотранспортной области требуется дополнительное изучение.

Классификация известных на текущий момент способов предупреждения разогрева элементов обвязки КУ приводится на рисунке 2. Способ 1 характеризуется простотой реализации, но при этом низкой скоростью заполнения участков МГ. Способ 2 характеризуется высокой скоростью заполнения участков МГ, однако при его реализации происходит выброс газа на площадке КУ, что вызывает потерю газа и создание аварийноопасной ситуации на рабочей площадке.

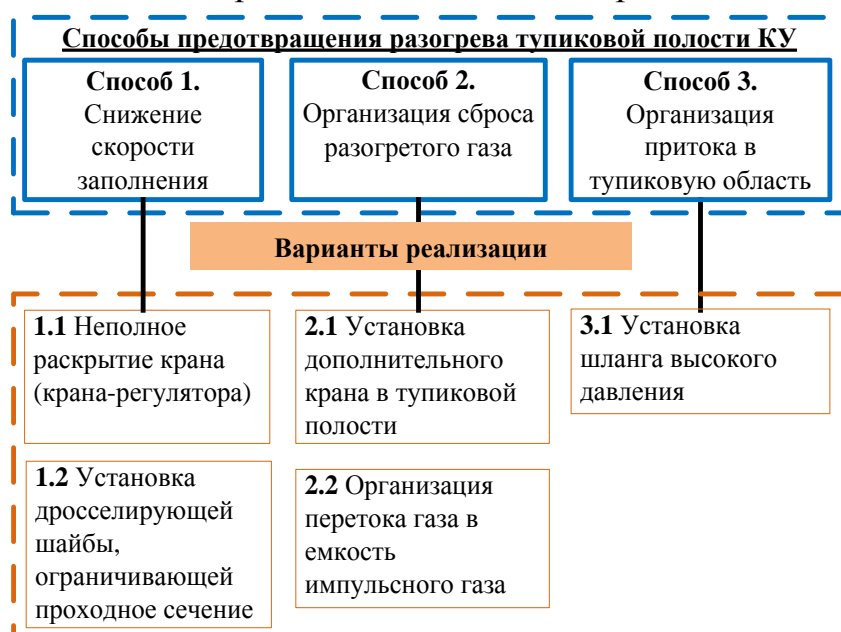


Рисунок 2. Классификация известных способов предотвращения разогрева тупиковых полостей КУ

Способ 3 характеризуется безопасностью проведения процесса заполнения участков МГ с высокой скоростью, но не дает гарантии по предотвращению появления разогрева (разогрев обвязки КУ может происходит в отдельных элементах и на отдельных участках трубопроводов).

Таким образом, существующие способы предотвращения нагрева тупиковых полостей трубопроводной обвязки

КУ не являются универсальными, требуют повышенного внимания со стороны обслуживающего персонала, и при этом являются потенциально аварийноопасными и/или не дают полную гарантию предотвращения роста температуры стояка ОИГ (или иных элементов КУ) выше допустимого значения.

Во второй главе «Моделирование нагрева тупиковых ответвлений технологической обвязки кранового узла» проработана схема построения компьютерной модели. Определена среда моделирования – ANSYS CFX. В качестве принятого подхода используется RANS подход (Reynolds Averaged

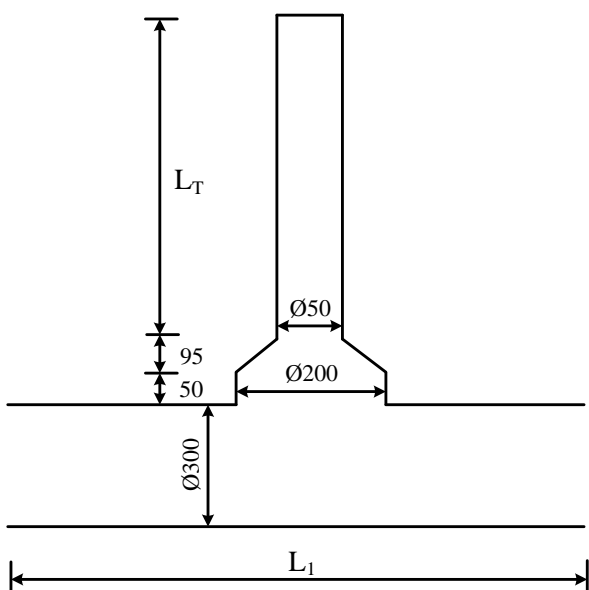
Navier–Stokes – осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса), модель турбулентности Ментора – переноса сдвиговых напряжений (SST – shear stress transport).

Основная система математических уравнений, используемых при этом:

1. Уравнение неразрывности:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0,$$
2. Уравнение движения:
$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau,$$
3. Уравнение энергии:
$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{V} \cdot \tau),$$
4. Тензор напряжений:
$$\tau = \mu \left(\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \vec{V} \right),$$

где ρ – плотность, \vec{V} – вектор скорости, p – давление, τ – тензор напряжений, h_{tot} – полная энтальпия, λ – теплопроводность, T – температура, δ – дельта Кронекера, μ – вязкость. Вязкость μ включает в себя ламинарную (физическую) вязкость и турбулентную (вихревую) вязкость, определение которой происходит за счет используемой модели турбулентности (система уравнение похожая на уравнения движения).

В качестве газовой среды принимается газ – чистый метан, описываемый уравнением Соав – Редлих – Квонга (Soave – Redlich – Kwong): $p = \frac{RT}{v-b} -$



**Рисунок 3. Модель соединения сто-
яка ОИГ и основного байпаса**

$\frac{a(T)}{v(v+b)}$, где v – мольный объем ($\text{м}^3/\text{моль}$), параметры $a(T)$, b – параметры конкретного газа.

Принцип построения компьютерной модели состоит в следующем:

- Выбор и построение геометрической области движения газа. В работе геометрическая модель строится в виде, изображенном на рисунке 3. Геометрия соответствует части линии основного байпаса и присоединенного к нему тупикового ответвления, при этом соединение выполнено с использованием тройника 300x200 и конического перехода 200x50 (200x100 при моделировании тупикового ответвления с диаметром 100 мм)

- Построение конечно-элементной сетки. Показан подход с использованием блочно-модульного построения сетки и т.н. технологией построения O-grid сетки. Схема разбиения моделируемой геометрии представлена на рисунке 4. Такое разбиение позволяет получить полностью гексаэдральную сетку, обладающую наилучшими параметрами по описанию вычисляемых полей и наилучшей сходимостью.

- Расчет размеров первого элемента (примыкающего к твердой поверхности) производится по формуле $r_1 = Ly^+ \sqrt{74} Re^{-13/14}$, где r_1 – непосредственно размер первого граничного элемента (в перпендикулярном направлении к твердой границе r_1), L – характерный размер модели, y^+ – расчетная величина (зависит от скорости потока и размера конечноэлементной сетки), Re – число Рейнольдса.

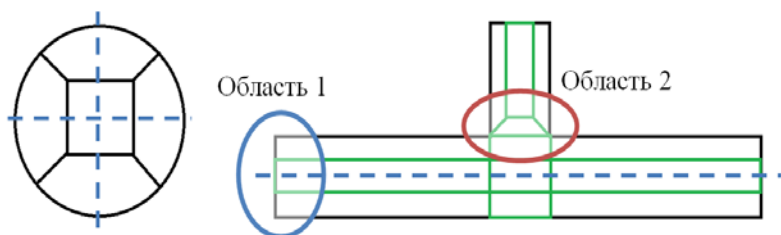


Рисунок 4. Схема разбиения моделируемой области на топологические четырехугольники

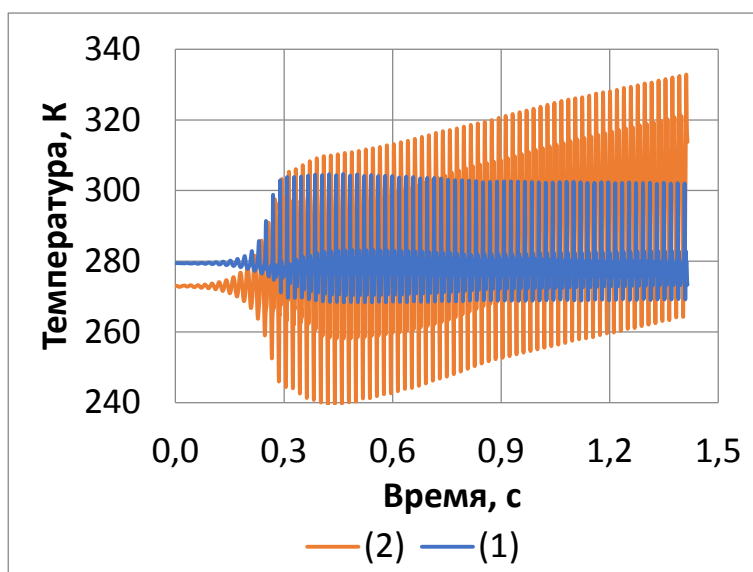


Рисунок 5. Изменение температуры на интервале времени $t=0..1,4$ с: (1) – полная температура в центре тройника (точка 1); (2) – абсолютная температура вблизи заглушенного дна (точка 2)

формуле: $f_c = \frac{c}{4L_T}$, где c – скорость звука в газе, L_T – глубина тупиковой полости (стояка ОИГ). Для тупиковой полости длиной $L_T=2$ м (размер близкий к характерному размеру стояка ОИГ) с давлением газа 0,3 МПа собственная частота $f_c=51,2$ Гц.

Вид характерной диаграммы роста температуры приводится на рисунке 5. На данной диаграмме отображается полная температура в точке соединения тупиковой полости и линии основного байпаса (1), а также абсолютная температура в окрестности заглушенного дна тупиковой полости (2). Видно, что с каждым колебательным циклом происходит увеличение температуры газа в окрестности заглушенного дна, с течением времени абсолютная температура (2) начинает превышать температуру торможения газа (1).

С помощью построенной компьютерной модели произведена серия вычислительных экспериментов. Варьировались следующие параметры:

- В качестве граничных условий выставляется: на входе – скорость и температура газа; на выходе – избыточное давление (0 МПа).

С помощью построенной, таким образом, модели производится моделирование эффекта Гартмана – Шпренгера в трубопроводной обвязке КУ. Показан механизм образования волн-сжатия разрежения, и возникающий, вследствие этого, разогрев газа в тупиковой полости. Данный колебательный процесс происходит на частоте, близкой к собственной частоте колебания газа в заглушенной полости, определяемой по

- геометрия соединения тупиковой полости и линии основного байпаса (вариант 1 – описанный выше способ соединения с использованием тройника 300x200 и конического перехода 200x50; вариант 2 – соединение, типа «прямая врезка»);
- скорость входящего потока газа;
- среднее давление входящего потока газа;
- относительная глубина полости $l_T = \frac{L_T}{D_T}$, где D_T – диаметр тупиковой полости (в т.ч. производилось варьирование как длины тупиковой полости, так и ее диаметра).

Для фиксированной геометрии, в соответствии с видом, приведенным на

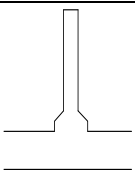
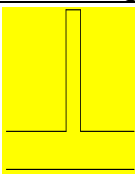
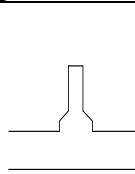
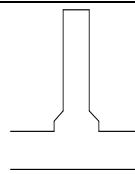
Таблица 1. Результаты расчетов с варьированием по физическим параметрам

Давление среды	$P_0 = 3$ ата	$P_0 = 30$ ата
$V = 300$ м/с	Разогрев есть	Разогрев есть
$V = 50$ м/с	Разогрева нет	Разогрева нет

рисунке 3, с диаметром тупиковой полости $D_T = 50$ мм и длиной $L_T = 2$ м, результаты вычислительных экспериментов с варьированием по скорости (V) и давлению (P_0) входящего потока приводятся в таблице 1.

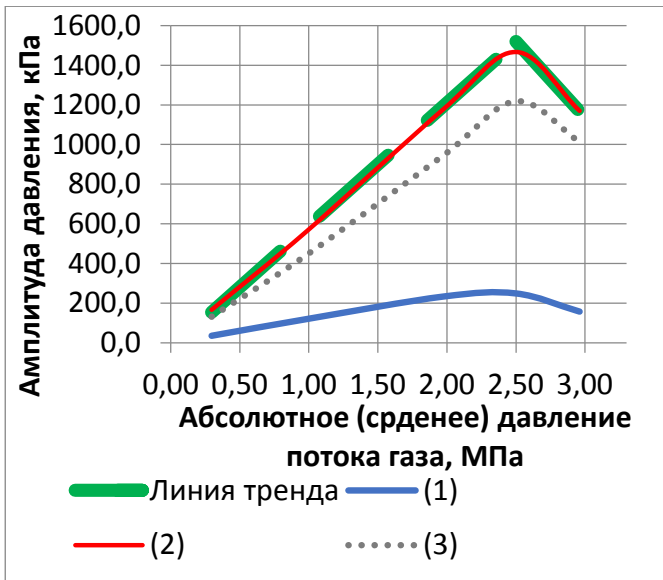
Результаты вычислительных экспериментов с фиксированным давлением входящего потока $P_0 = 0,3$ МПа и варьированием геометрических параметров приводятся в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчетов с варьированием по геометрическим параметрам

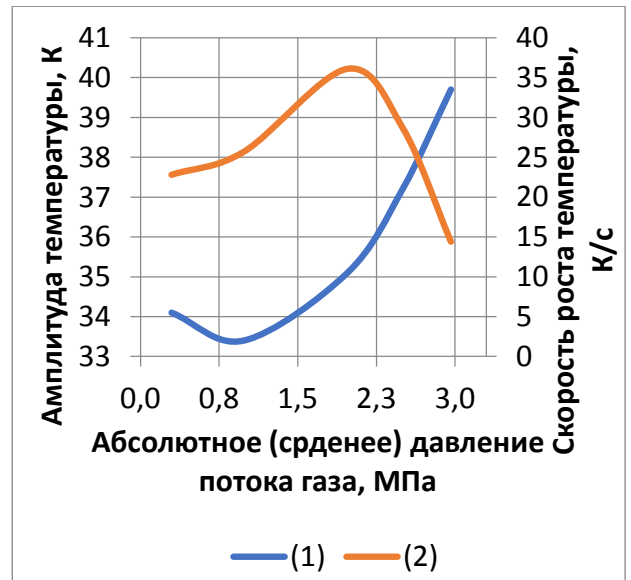
	 $L_T = 2$ м $D_T = 50$ мм	 $L_T = 2$ м $D_T = 50$ мм	 $L_T = 1$ м $D_T = 50$ мм	 $L_T = 2$ м $D_T = 100$ мм
$V = 300$ м/с	Разогрев есть	Разогрева нет	Разогрев есть	Разогрев есть
$V = 50$ м/с	Разогрева нет	Разогрева нет	Разогрева нет	Разогрева нет

Анализ приведенных результатов вычислительных экспериментов позволяет установить критерии возникновения эффекта нагрева газа в тупиковой полости – наличие специфической геометрии и высокой скорости движения газа. Величина абсолютного (среднего) давления входящего потока не влияет на факт появления нагрева в тупиковой полости.

Помимо этого, в результате проведенных дополнительных серий вычислительных экспериментов установлены зависимости параметров, характеризующих рост температуры газа в тупиковой полости (амплитуда пульсации давления и температуры газа, скорость роста температуры газа), от величины абсолютного (среднего) уровня давления газа в линии основного байпаса и от относительной глубины тупиковой полости. Характер зависимостей представлен на рисунках 6, 7.

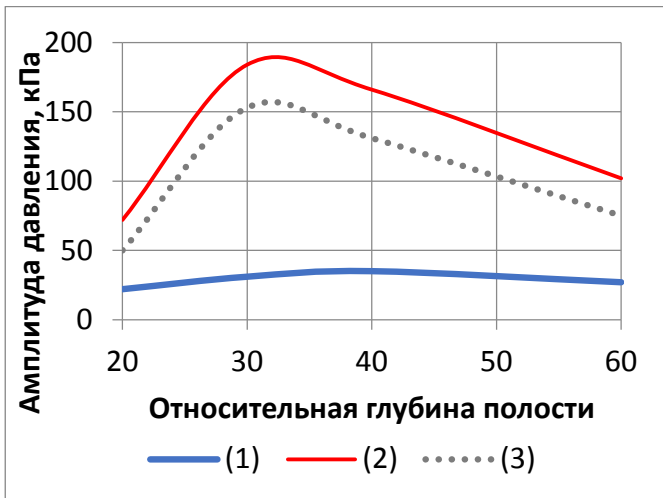


А) Зависимость амплитуд давления от величины абсолютного (среднего) давления основного потока в диапазоне от 0,3..3,0 МПа; (1) – амплитуда в точке 1, (2) – амплитуда в точке 2, (3) – разность амплитуд 1 и 2.

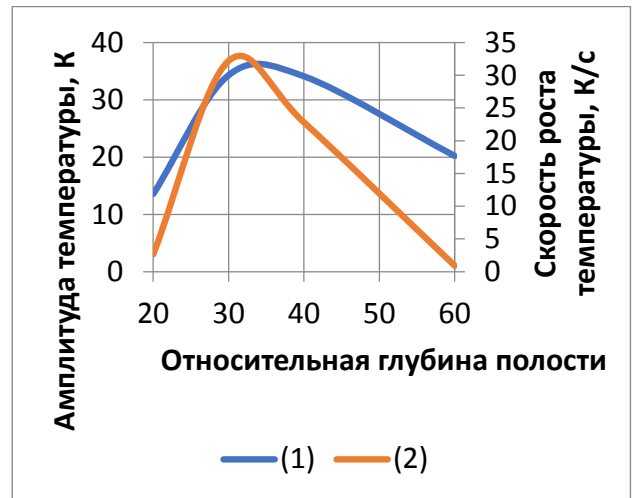


Б) Зависимость амплитуды пульсации температуры – (1) и скорости роста температуры – (2) от абсолютного (среднего) давления потока газа в диапазоне 0,3..3,0 МПа

Рисунок 6



А) Зависимость амплитуд давления от относительно глубины полости; (1) – амплитуда в точке 1, (2) – амплитуда в точке 2, (3) – разность амплитуд 1 и 2



Б) Зависимость амплитуды пульсации температуры – (1) и скорости роста температуры – (2) от относительной глубины полости

Рисунок 7

На рисунке 6.А приводится так же аппроксимирующая составная линия (линия тренда) для амплитуды пульсации давления. Составная линия описывается следующим образом:

$$\begin{cases} y = k_1x + b_1, & \text{для } x < x_{\text{крит}} (k_1 > 0) \\ y = k_2x + b_2, & \text{для } x > x_{\text{крит}} (k_2 < 0) \end{cases}$$

В рассмотренных вариантах точка критического давления находится в диапазоне 2,3÷2,6 МПа.

Зависимости величин, описывающих процесс роста температуры в тупиковой полости, от относительной глубины имеют аналогичный характер. Экстремальной точке, определяющей максимальные значения пульсаций давления и температуры, скорости роста температуры, соответствует зона $l_T = 30 \div 35$.

Математическая модель движения газа в линии основного байпаса строится как объединение моделей двух известных задач: истечение газа из объема во внешнюю среду, движение газа с околосвуковой скоростью по трубке.

Течение газа через сечение $S(\alpha)$ (от суммарной площади раскрытия регулирующих кранов 1Б DN300 и 2Б1С DN100) при известном соотношении давлений p_4/p_3 (где p_4, p_3 – давление после/до сечения, соответственно; индексы величин относятся к сечениям, обозначенным на рисунке 1) может носить разный характер:

1. При $p_4 > p_k'$ ($p_k'/p_3 = 0,54$ для метана) характер течения докритический, расход газа определяется по формуле:

$$QV = \frac{S(\alpha)p_3}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{2/k} - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{(k+1)/k} \right]}, \quad \frac{p_k'}{p_3} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)},$$

где k – показатель адиабаты газа, R – газовая постоянная, T_1 – температура газа до сечения $S(\alpha)$.

2. При $p_4 < p_k'$ характер течения сверхкритический, расход газа не зависит от давления p_4 : $QV_{max} = m\varphi(S) \frac{S(\alpha)p_3}{\sqrt{T_1}}$, m – константа, зависящая от газа, $\varphi(S)$ – коэффициент пропускной способности сечения (характеризует геометрическую особенность сечения). Величины m и $\varphi(S)$ определяются по формулам:

$$m = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}}, \quad \varphi(S) = \frac{1}{1+0,707 \sqrt{1 - \frac{S(\alpha)}{S_L}}},$$

где S_L – площадь трубопровода за сечением $S(\alpha)$.

Течение газа вдоль байпасной линии на выходном участке (обозначенном т.4 – т.6) также может быть разным:

1. При $p_6 > p_k''$ характер истечения докритический, в этом случае основным уравнением движения идеального газа (в предположении адиабатичности

потока) можно считать: $\frac{1}{\lambda_6^2} - \frac{1}{\lambda_4^2} - \ln \left(\frac{\lambda_6^2}{\lambda_4^2} \right) = \frac{2k}{k+1} \cdot \zeta \frac{L}{D}$, $\lambda_i = \frac{U_i}{a^*}$, где λ_i – приведенная скорость, ζ – коэффициент сопротивления трубопровода, a^* – критическая скорость (локальная скорость звука), D – диаметр трубопровода на участке т.4 – т.6.

2. При $p_6 < p_k''$ характер истечения сверхкритический, расход газа не зависит от выходного давления в участке МГ после КУ, поскольку достигается максимально возможный расход газа, определенный условием $\lambda_6=1$: $QL_{max} = \frac{p_6}{RT_2} a^* S_6$, где S_6 – площадь трубопровода в т.6.

На основании анализа построенной математической модели разработан алгоритм определения скорости движения газа мимо тупиковой полости (обозначено в работе U_5), в зависимости от заданного перепада давления до и после КУ, а также от суммарной площади раскрытия регулирующих кранов 1Б DN300

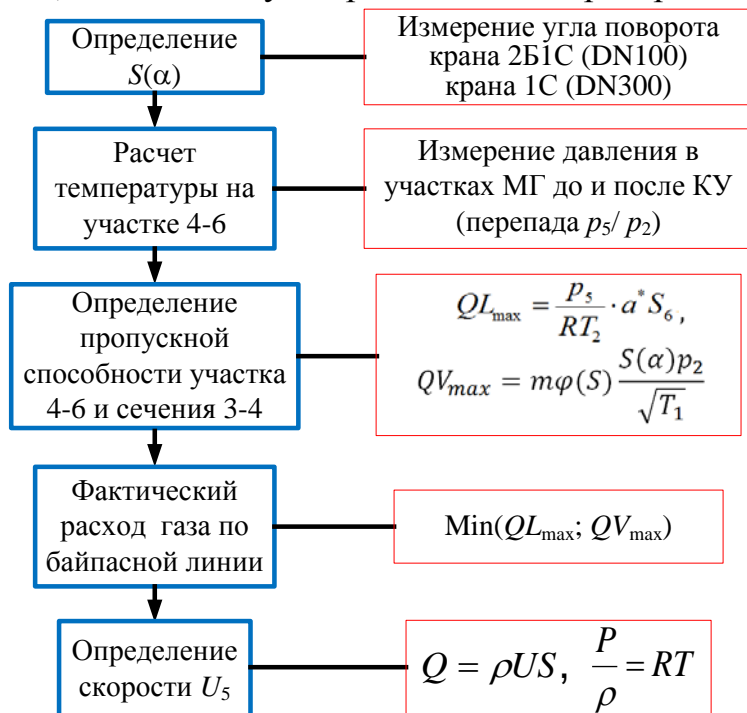


Рисунок 8. Алгоритм определения скорости движения газа по байпасной линии в окрестности тупиковой полости

и 2Б1С DN100. Схема алгоритма приводится на рисунке 8.

В формулах данного алгоритма: p_5, p_2 – давление по показаниям манометров на низкой, высокой стороне КУ, соответственно, T_2 – температура газа после.

В третьей главе «Экспериментальные исследования» Обоснованы и выбраны объекты проведения экспериментальных исследований. Разработана методика проведения экспериментальных исследований. Построен факторный план, определены управляющие факторы. Обосновано и выбрано оборудование, используемое в экспери-

ментальных исследованиях.

С учетом планов производственно-технических работ, связанных с опорожнением и заполнением участков МГ на различных газопроводах, выбраны следующие объекты для проведения исследований:

- МГ «Бованенково – Ухта» I (1 нитка). Согласно плану работ, планировалось заполнение участка км 276,9 – км 300,8. В качестве объекта исследования подходил КУ №11 (км 276,9).
- МГ «Сахалин – Хабаровск – Владивосток». Согласно плану работ, производились огневые сварочные работы на крановых узлах, в связи с чем, производилось полное опорожнение участков МГ с последующим заполнением. Объектами исследования явились КУ км 184, км 208.

На данных объектах получены режимы заполнения участков МГ, в которых проявляется эффект Гартмана – Шпренгера – наблюдается разогрев поверхности стояка ОИГ, температура поверхности достигала $55 \div 75^\circ\text{C}$.



Рисунок 9. График изменения температуры поверхности стояка ОИГ в процессе исследований

Диаграмма температуры поверхности стояка ОИГ в зависимости от времени, площади раскрытия крана 1С DN300 и соотношения давлений до и после КУ, полученная в ходе исследований на КУ км 184 МГ «Сахалин – Хабаровск – Владивосток» приводится на рисунке 9. Точки замера температуры поверхности обозначены на фотографии стояка ОИГ справа. Под графиком температуры приводится информация о состоянии («открыто»-«закрыто») ЗА и величине открытия проходного сечения линии дополнительного байпаса DN100 (кран 2Б1С) и линии основного байпаса DN300 (кран 1С) в процессе проведения экспериментальных замеров.

Аналогичные диаграммы были получены во время проведения других экспериментов.

В процессе проведения экспериментальных исследований производилось неполное открытие крана 1С DN300 и замеры температуры поверхности стояка ОИГ. Если температура поверхности возрастала до величин близких к недопустимой величине 80 °C, производилось обратное закрытие крана 1С. После чего выжидалось некоторое время и попытка открытия повторялась вновь.

На приведенном рисунке 9, отмечены предельные величины раскрытия крана 1С с течением времени (и нарастающим отношением давлений). Видно, что с увеличением отношения давлений предельный угол раскрытия крана возрастает. Эффект разогрева выше температуры торможения может возникать только при сверхкритическом перепаде давления (для чистого метана $p_2/p_1 \leq 0,55$), что соответствует, результатам полученным из аналитической модели в

главе 2. Характерные термограммы стояка ОИГ и линии дополнительного байпаса DN300 приведены на рисунке 10.

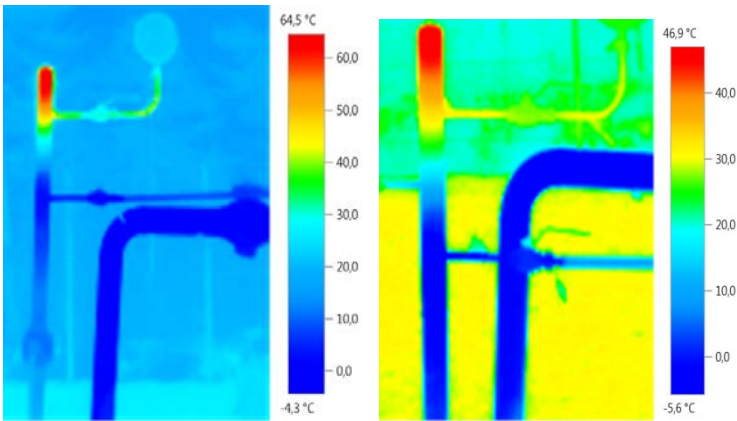


Рисунок 10. Термограммы стояка ОИГ в характерные моменты времени

постепенным охлаждением нагретых областей трубопроводной обвязки.

Произведен анализ результатов экспериментальных исследований с точки зрения аналитической модели движения газа по байпасной линии, определены скорости движения газа в условиях проведенных экспериментов.

Показано, что для возникновения эффекта нагрева тупиковой полости скорость движения газа по основной линии байпаса в окрестности тупиковой полости должна быть в диапазоне $0.7..1\lambda$. Указанная скорость движения газа полностью определена исходя из физических свойств газа, с учетом конкретных условий (давление, температура и т.п.), а также в зависимости от величины

угла раскрытия кранов-регуляторов 2Б1С и 1С.

Предложена методика определения допустимого раскрытия проходного сечения байпасной линии (с учетом совместного раскрытия основной и дополнительной линии байпаса). Найденное таким способом сечение будет обеспечивать максимально допустимую скорость заполнения участка МГ при обеспечении условия не возникновения разогрева газа в тупиковой полости выше

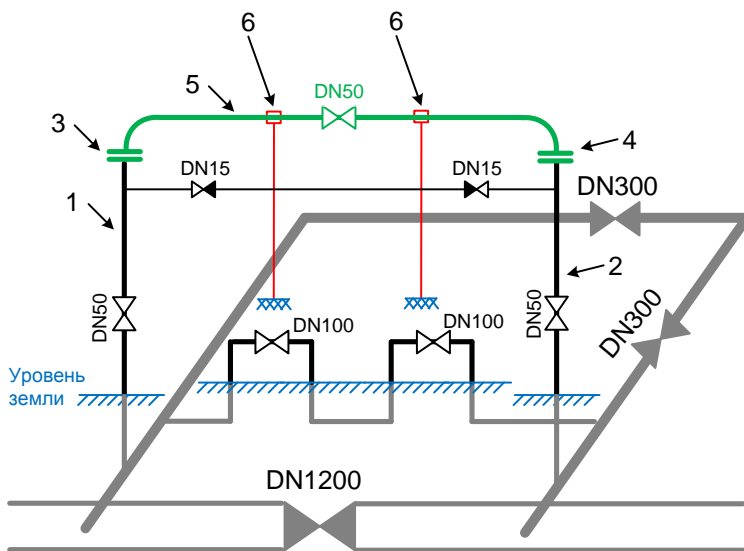


Рисунок 11. Схема дополнительной перемычки, соединяющей стояки ОИГ

температуры торможения

В четвертой главе «Разработка, усовершенствование и внедрение способов эксплуатации крановых узлов» сформулированы способы предотвращения разогрева тупиковых полостей в обвязке КУ, применимые на различных жизненных стадиях газопровода.

Во-первых, предложено усовершенствование метода организации перетока газа между стояками ОИГ – предлагается устройство дополнительной перемычки, схематично изображенной на рисунке 11.

Перемычка 5 присоединяется к торцевым фланцам стояков 1, 2 с помощью фланцевого соединения 3, 4 (в случае отсутствия фланцевого соединения необходимо его приварить). Перемычка выполняется того же диаметра, что и стояки ОИГ – DN50. Для исключения прогиба перемычки при необходимости сооружаются промежуточные опоры 6.

Использовать данную перемычку необходимо при проведении заполнения участков МГ. Заполнение участков МГ осуществляется в соответствии с нормативными документами, например, СТО 60.30.21-00159025-55-01-2013 «Порядок производства работ по пуску в работу участков магистральных газопроводов». Отличительной особенностью предлагаемого варианта является то, что при продувке и заполнении межкранового участка МГ краны DN50 стояков ОИГ 1, 2 и кран DN50 перемычки 5, устанавливаются в положение «Открыто», тем самым обеспечивается расход газа по стоякам и соединяющей их перемычке. Ключевые достоинства предлагаемого решения:

- исключены тупиковые участки, что предотвращает возможность их нагрева;
- исключается стравливание газа в атмосферу (рабочую зону);

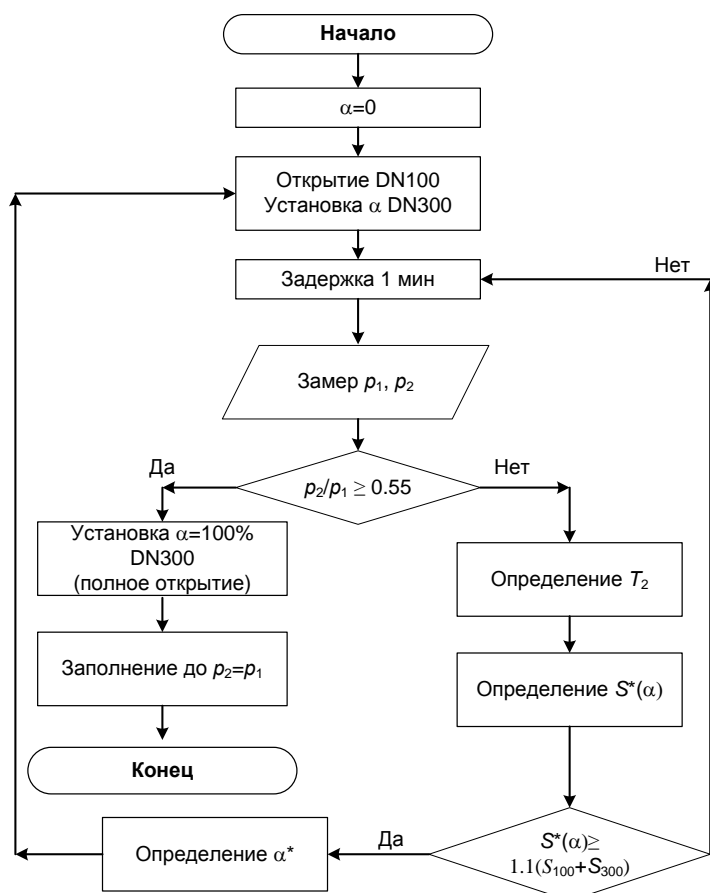


Рисунок 12. Алгоритм безопасного заполнения участка МГ с повышенной скоростью заполнения

- монтаж перемычки осуществляется без применения огневых работ.

Данное решение можно использовать как на этапе проектирования, так и при проведении реконструкции обвязки КУ, в случае наличия достаточных материально-технических и временных ресурсов.

На способ использования данной перемычки в конструкции КУ получен патент. Согласно приказу Роспатента, данный патент вошел в список «100 лучших изобретений России» за 2016 г.

Во-вторых, разработан алгоритм управления кранами (регуляторами) на существующем КУ, позволяющий максимизировать скорость заполнения участка МГ, при обеспечении не появления

эффекта разогрева тупиковых полостей в обвязке КУ. Схематично алгоритм представлен на рисунке 12. Пояснить алгоритм можно следующим образом: по заданному перепаду давлений до и после КУ определяется предельно допустимое суммарное проходное сечение регулирующих кранов (1С и 2Б1С) – $S^*(\alpha)$, в соответствии с моделью, разработанной в главе 2, по формуле:

$$S^*(\alpha) = \frac{1}{m \cdot \varphi(S)} \frac{p_2}{p_1} \frac{T_1}{T_2} \sqrt{\frac{2k}{R \cdot (k+1)}} \cdot S_L$$
, в данной формуле p_1, p_2 – давление до и после КУ, T_1, T_2 – соответственно температура газа до и после крана-регулятора 1С.

Отличительной особенностью данного решения является то, что оно не требует никаких дополнительных действий и работ, можно применять по принципу «здесь и сейчас», применимо на любом КУ.

В-третьих, предлагается конструктивное улучшение типового проектного решения. Согласно "Альбом унифицированных проектных решений" соединение стояка ОИГ DN50 и линии основного байпаса DN300 рекомендуется осуществлять с помощью тройника 300x200 и конического (сферического) перехода 200x50 (аналогичная схема используется и для соединения линии основного байпаса с линией дополнительного байпаса DN100). При такой геометрии соединения, как показывают результаты проделанной работы, возможно проявление эффекта разогрева элементов КУ. Однако, если указанное соединение выполнено по типу «прямая врезка», разогрева тупиковой полости не происходит ни при каких режимах заполнения участка МГ. Поэтому рекомендуется использовать деталь заводского изготовления типа «прямая врезка» для выполнения соединений ответвлений от основной линии байпаса.

Данное решение следует использовать как типовое решение при проектировании. Также в случае проведения реконструкции КУ (переизоляции подземной части обвязки КУ, замена трубных деталей и/или отрезков трубопровода обвязки КУ и т.п.) следует рассмотреть возможность замены существующих соединений на подобные детали (типа «прямая врезка») заводского изготовления.

В работе построен алгоритм, позволяющий выбрать рациональное решение из предложенных способов предотвращения разогрева элементов трубопроводной обвязки КУ в зависимости от жизненной стадии газопровода, с учетом возможности проведения дополнительных технико-технологических операций. Алгоритм приводится на рисунке 13.

В рамках апробации предложенных способов улучшения эксплуатации КУ были проведены работы по внедрению решений конкретные КУ различных МГ. Подробно разбираются два примера:

1. Апробация варианта №1 «Перемычка между стояками» выполнена на «КУ Г-1 км 725» в режиме заполнения участка МГ «Ухта – Торжок 1» (1 нитка), км 725-761 Юбилейного ЛПУ МГ.

2. Апробация варианта №3 «Прямая врезка» произведена на «КУ №877» МГ «Сахалин – Хабаровск – Владивосток», км 877, в трех режимах заполнения (для различного сочетания давлений до и после КУ).

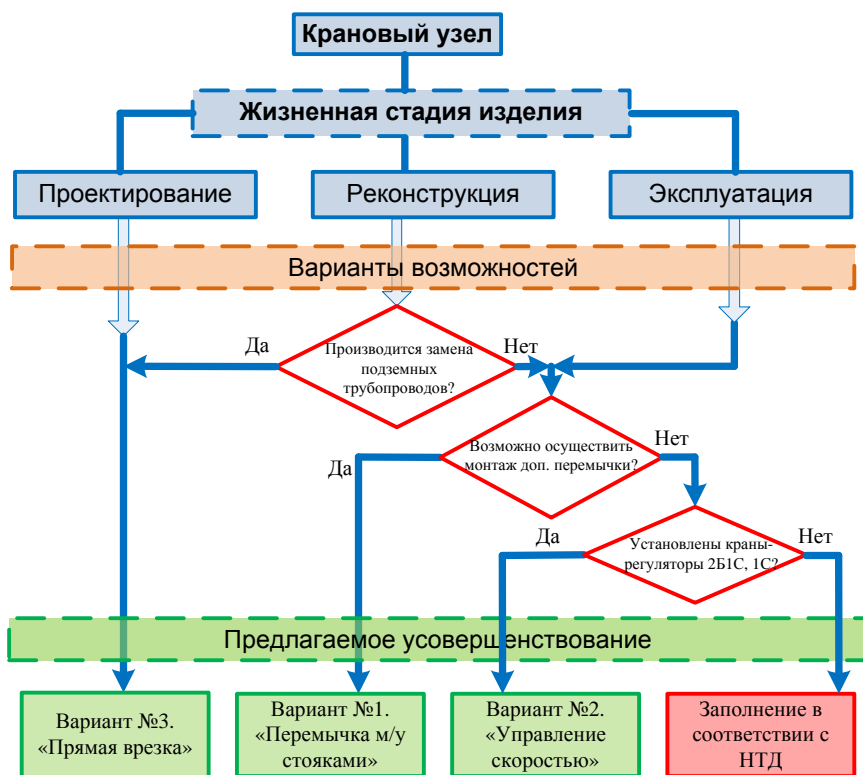


Рисунок 13. Блок-схема выбора оптимального решения по усовершенствованию конструкции или способа эксплуатации КУ

Показано, что внедренные решения являются эффективными, позволяют производить заполнение участков МГ с повышенными скоростями и предотвращают появление эффекта нагрева элементов трубопроводной обвязки КУ.

Оценки времени заполнения участка МГ, показывают эффективность предложенных решений. Так для участка длиной $L=3$ км время заполнения с использованием предложенного решения составляет

50 минут, без использования – от 7,5 ч до 133 ч (в зависимости от используемого регламента). Для участка длиной $L=20$ км разница будет увеличиваться: без использования предлагаемых решений – 51,7 часа (133 ч), а с использованием предложенных решений – 5,6 часа. Указанное сокращение времени влечет за собой соответствующее повышение товаротранспортной работы МГ.

При внедрении предложенных решений в рамках одного газотранспортного общества (ООО "Газпром трансгаз Ухта") величина фактического интегрального эффекта за 2017 год составила 4,74 млн. р. Величина интегрального эффекта за период с 2017 по 2027 года составляет 410,49 млн. р., индекс эффективности достигает 31,66 ед.

Проведенный анализ оценочного времени заполнения участков МГ показывает, что для участков характерной длиной 25-30 км и давлением порядка 4,0 МПа, экономия времени заполнения достигает 2-3 суток при использовании предлагаемых решений, в сравнении со временем без использования предложенных способов предотвращения нагрева элементов обвязки КУ. Для участков МГ с большим рабочим давлением экономия времени будет еще существеннее. Таким образом, предлагаемые решения являются эффективными и с точки зрения экономии времени ввода в эксплуатацию участка МГ.

Основные выводы:

1. Показано, что при эксплуатации КУ в процессе заполнения участков МГ могут возникать аварийные ситуации, связанные с разогревом элементов обвязки КУ, повлекшие оплавление изоляции, нарушение уплотнений ЗА и пр.

Установлено, что разогрев тупиковых полостей происходит в связи с возникновением в обвязке КУ эффекта Гартмана – Шпренгера.

2. Разработана схема построения компьютерной модели движения газа в обвязке КУ в окрестности тупикового ответвления, учитывающей основные физические свойства реального газа.

Вычислительные эксперименты, позволили установить критерии возникновения эффекта разогрева газа в тупиковых полостях обвязки КУ в процессе заполнения прилегающего участка МГ, а также зависимости величин, характеризующих процесс роста температуры газа в тупиковой полости, от уровня абсолютного давления в обвязке КУ и от относительной глубины полости (относительная глубина равна отношению глубины к диаметру полости, $l_T = L_T/D$). Обнаружено, что данные зависимости имеют критическую точку, являющуюся экстремальным значением

3. Построена математическая модель движения газа в байпасной линии обвязки КУ в момент заполнения участка МГ. Получен алгоритм определения скорости движения газа мимо тупиковой полости в линии основного байпаса в зависимости от соотношения давлений до и после КУ и от угла раскрытия регулирующих кранов.

4. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по разогреву элементов обвязки КУ при заполнении участка МГ. Исследования подтвердили критерии возникновения рассматриваемого эффекта разогрева, ключевыми требованиями для возникновения эффекта совместно являются: сверхкритический перепад давления после и до КУ, наличие специфической геометрии соединения тупиковой полости и линии основного байпаса, а также определенная величина раскрытия регулирующего крана.

5. Предложены и запатентованы варианты предотвращения нагрева тупиковых участков обвязки КУ в процессе жизненного цикла, применимые как на стадии проектирования, так и на стадиях эксплуатации и/или реконструкции существующих КУ. Разработан алгоритм выбора рационального технико-технологического решения по предотвращению возникновения эффекта Гартмана – Шпренгера, с учетом различных вариантов возможных действий по модификации обвязки кранового узла.

6. Результаты внедрены при проведении ремонтно-восстановительных работ на:

- «КУ Г-1 км 725» МГ «Ухта – Торжок 1» (1 нитка);
- «КУ №877» МГ «Сахалин – Хабаровск – Владивосток» км 877.

При внедрении предложенных решений в одну эксплуатирующую организацию за 2017 год получен интегральный экономический эффект 4,74 млн. р.

Результаты внедрены при разработке отраслевого стандарта ПАО «Газпром» «Магистральный газопровод. Обвязка технологического оборудования. Техничко-технологические и конструктивные решения».

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

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Парфенов, Д.В. Расчет предельной скорости движения газа по байпасной линии кранового узла при заполнении участка газопровода / Парфенов Д.В., Агинец Р.В., Дуничев А.А. // Трубопроводный транспорт [теория и практика] - №6 (64) 2017. С.41-45.

2. Парфенов, Д.В. Экспериментальные исследования нагрева тупиковых ответвлений крановых узлов при заполнении газом магистрального газопровода «Сахалин-Хабаровск-Владивосток» / Парфенов Д.В., Агинец Р.В. // Трубопроводный транспорт [теория и практика] - №3-4 (43-44) 2014. С.50-54.

3. Савченков, С.В. Численное моделирование в ANSYS CFX явления нагрева тупиковых ответвлений крановых узлов при заполнении газом участков МГ /Савченков С.В., Агинец Р. В., Репин Д. Г., Наместников Г. И., Парфенов Д.В. // Газовая промышленность.- 2013. -№13. С.13-17.8.

Свидетельства и патенты:

4. Савченков, С.В. Численное моделирование в ANSYS Пат. № 2577896 Российская Федерация, F16D 3/00 (2006.001). Способ предупреждения нагрева элементов трубной обвязки кранового узла при заполнении участков газопроводов./ Р.В. Агинец, С.В. Савченков и др. – №2014154537/06; заявл. 31.12.2014; опубл. 20.03.2016 Бюл.№ 8.

Статьи в научно-технических сборниках и других изданиях:

5. Парфенов, Д.В. Расчетно-аналитическое определение скорости движения газа по обвязке кранового узла в процессе заполнения участков газопровода/ Д.В. Парфенов, Р.В. Агинец, А.С. Попков // Трубопроводный транспорт – 2017: тезисы докладов XII Междунар. Уч.-науч.-практ. конф., Уфа, 2017 г. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. С.154-156.

6. Парфенов, Д.В. Разогрев тупиковых ответвлений. Вычислительные эксперименты и натурные исследования / Д.В. Парфенов, А.С. Попков // Рассохинские чтения: материалы междунар. конф. В 2 ч. – Ухта: УГТУ, 2017. С.275-277.

7. Парфенов, Д.В. Результаты экспериментальных и расчетно-аналитических исследований процесса перепуска газа на крановом узле при заполнении участков газопровода / Д.В. Парфенов, А.С. Попков // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: материалы Междунар. науч.-практ. конф. В 2-х томах – Тюмень: ТИУ, 2017. С.275-277.

8. Парфенов, Д.В. Численное исследование явления нагрева тупиковых ответвлений крановых узлов при различных условиях // Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика): материалы юбилейной 10 всерос. конф. мол. уч., спец. и студ., Москва РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2013. – с.37.

9. Парфенов, Д.В. Численное моделирование в ANSYS CFX явления нагрева тупиковых ответвлений крановых узлов при заполнении газом магистрального газопровода / Д.В. Парфенов, Г.И. Наместников //Актуальные вопросы проектирования объектов транспорта нефти и газа: материалы науч.-

практ. конф. мол. уч. и спец. науч.-иссл. и проект. орг., Нижний Новгород: АО "Гипрогазцентр", 2013. - с.21.

10. Парфенов, Д.В. Экспериментальные исследования нагрева тупиковых ответвлений крановых узлов при заполнении газом магистрального газопровода / Д.В. Парфенов, Р.В. Агинеи // Актуальные вопросы проектирования объектов транспорта нефти и газа: материалы II науч.-практ. конф. мол. спец. АО "Гипрогазцентр", Нижний Новгород: АО "Гипрогазцентр", 2015. - с.16.

11. Парфенов, Д.В. Экспериментальные исследования нагрева тупиковых ответвлений крановых узлов при заполнении газом магистрального газопровода / Д.В. Парфенов, Р.В. Агинеи // Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика): материалы 11 всерос. конф. мол. уч., спец. и студ., Москва РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015. – с.186.

12. Парфенов, Д.В. Исследование причин и разработка мероприятий по предотвращению нагрева тупиковых ответвлений крановых узлов при заполнении газом магистрального газопровода / Д.В. Парфенов // Современная газотранспортная отрасль: перспективы, проблемы, решения: сборник статей материалы VIII науч.-практ. конф. мол. уч. и спец., Томск, 2017. – с.81-85.