

На правах рукописи



КУЗЬБОЖЕВ ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИЙ
В ТРУБОПРОВОДАХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

Специальность – 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ухтинский государственный технический университет» на кафедре «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов»

Научный руководитель: Бирилло Игорь Николаевич,
кандидат технических наук, начальник лаборатории надежности объектов газотранспортной системы филиала
ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта

Официальные оппоненты: Поляков Вадим Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов» РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

Китаев Сергей Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Защита диссертации состоится «20» июня 2019 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета по адресу: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13. Автореферат размещён на интернет-сайте Ухтинского государственного технического университета www.ugtu.net в разделе «Диссертации».

Автореферат разослан «26» апреля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Дмитрий Андреевич Борейко

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В соответствии с законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» газораспределительные станции (ГРС) являются опасными промышленными объектами, которых в России насчитывается более 3500 ед. с суточной подачей газа потребителям более 1200 млн. м³.

В настоящее время большинство газопроводных систем российского топливно-энергетического комплекса, транспортирующих природный газ, находятся в эксплуатации уже свыше 30 лет, фактически приближаясь к грани своего проектного ресурса. Старение и изнашивание трубопроводных конструкций может приводить к авариям, так как ГРС преимущественно расположены в городской черте, то их разрушение будет приводить к тяжелым социальным, экологическим и экономическим последствиями. По данным ПАО «Газпром» 92 % утечек природного газа приходится на утечки из газораспределительных систем, что составляет около 3 % от всего добытого газа.

По сравнению с магистральными газопроводами ситуация на ГРС осложняется воздействием на газопроводы динамического нагружения, вибраций, возникающих на участках после автоматических регуляторов давления, в которых происходит снижение давления газа. Значительное число ГРС работает с перегрузкой по объемному расходу газа, при этом происходит существенное увеличение скорости потока газа, которая в реальных условиях, зачастую, превышает нормативно установленные значения. Это вызывает повышение уровня вибраций газопроводов, что негативно сказывается на надежности технологических трубопроводов ГРС. Таким образом, с точки зрения обеспечения надежности и безопасности эксплуатации ГРС, исследования по уменьшению параметров динамического вибрационного нагружения технологических трубопроводов ГРС, являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования.

Степень разработанности темы исследования достаточно высока. При этом есть локальные нерешенные задачи. Несмотря на наличие разнообразных средств и методов снижения вибраций в технологических трубопроводах ГРС, подверженных динамическому нагружению, простые и эффективные технические решения по снижению вибраций на трубопроводах ГРС, адаптированные к ГРС с большими объемными расходами газа, отсутствуют.

Цель работы. Выявление закономерностей возникновения вибраций в трубопроводах газораспределительных станций, вызванных высокоскоростным потоком газа, для совершенствования метода и разработки научно обоснованных технических решений по снижению вибраций, адаптированных к ГРС с большими объемными расходами газа.

Задачи исследования:

1) выполнить обзор и анализ состояния методов снижения вибраций в технологических трубопроводах ГРС;

- 2) выполнить экспериментальную оценку механических свойств металла труб технологических трубопроводов ГРС, подверженных воздействию вибраций;
- 3) выполнить расчетное моделирование динамических параметров нагружения трубопроводной обвязки ГРС;
- 4) разработать и обосновать технические решения по уменьшению уровня вибраций в трубопроводной обвязке ГРС с большими объемными расходами газа.

Научная новизна:

– Изучены причинно-следственные связи процесса изменения характеристик пластических свойств металла труб из стали Ст. 4, вызванных динамическим вибрационным нагружением газопровода редуцирования и характеризующихся уменьшением на 5–25 % относительного удлинения и сужения образцов относительно нижнего нормативного предела при испытаниях на статическое растяжение.

– Определены условия возникновения пульсаций давления газа в проточной части симметричного клапана-регулятора, обусловленные наличием в высокоскоростном потоке газа (от 350 м/с и выше) нестабильных, циклически изменяемых по размеру с частотой от 100 Гц и выше, пристеночных вихревых зон, обеспечивающих периодическое снижение эффективного проходного сечения канала на 50 % и выше, и как следствие, вызывающие пульсирующие изменения давления и скорости огибающего вихревые зоны потока.

– Определены условия формирования и характеристики вибрации трубопроводной обвязки клапана-регулятора ГРС. Установлено, что при частоте пульсации давления газа от 600 Гц и выше с амплитудой от 50 % от давления редуцирования, на участке низкого давления линии редуцирования, вне зависимости от условий закрепления труб, будут возникать значительные по амплитуде и среднеквадратичному значению виброскорости (от 30 мм/с и выше), механические колебания, сопровождающиеся высокочастотным сжатием и расширением сечения труб с сохранением формы оси линии редуцирования.

Теоретическая значимость работы обоснована тем, что:

– Доказаны положения о деградации механических свойств металла труб газопроводов газораспределительной станции в поле действия динамического нагружения от пульсаций высокоскоростного потока газа, вносящее вклад в расширение представлений об изучаемых процессах изменения свойств металла в зависимости от параметров нагружения газопроводов.

– Изложены доказательства существования в газопроводе редуцирования трех основных областей завихрения высокоскоростного потока газа, расположенных в проточной части клапана-регулятора, диффузоре и начальной части второго прямолинейного канала.

– Раскрыты существенные проявления теории и факторы, влияющие на генезис процесса развития вибраций с образованием вихревых зон и пульсаций давления в них.

– Проведена модернизация существующей математической модели скоростного потока газа на основе пространственной схематизации процесса истече-

ния газа из области высокого в область низкого давления через канал сложной формы, расположенный на участке за клапаном-регулятором.

Практическая ценность работы. Разработаны и расчетным путем обоснованы новые технические решения по стабилизации высокоскоростного потока газа в газопроводе редуцирования на ГРС, адаптированные к условиям существенных перегрузок газораспределительного оборудования по объемному расходу и скорости потока газа на ГРС. Разработаны практические рекомендации по реализации методов диагностирования состояния металла труб газопроводов, подверженных динамическому нагружению от скоростного потока газа. Результаты диссертационной работы использованы в ходе работ по диагностированию вибрационного состояния трубопроводной обвязки газораспределительной станции «Эжва» ООО «Газпром трансгаз Ухта».

Разработанные технические решения предложены к внедрению в ООО «Газпром трансгаз Ухта». Получен патент РФ № 2666077 на изобретение «Регулятор давления газа» (заявка № 2017120692, дата приоритета 13.06.2017).

Методы исследования.

Математическое моделирование и теоретические исследования с использованием программного комплекса Ansys CFX, графического редактора Design Modeler, позволяющих решать задачи вычислительной газодинамики методом конечных элементов, методы механических испытаний, определение твердости, оптическая металлография металла труб, измерение вибраций газопроводов, методы статистического и регрессионного анализа экспериментальных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

– Экспериментальные результаты исследования механических свойств металла труб газопроводов ГРС, позволяющие дать оценку степени их ухудшения под воздействием вибрационного динамического нагружения.

– Расчетное обоснование динамических параметров нагружения трубопроводной обвязки ГРС, позволяющее выявить наиболее нагруженные участки трубопроводов.

– Расчетное обоснование новых технических решений по стабилизации высокоскоростного потока газа в газопроводе редуцирования на ГРС, позволяющих снизить уровень вибрационного нагружения трубопроводов.

Степень достоверности результатов и выводов.

Проведена верификация собственных расчетных результатов с результатами натурального эксперимента по измерению вибрационного состояния технологических трубопроводов ГРС, а также с результатами теоретических, лабораторных, стендовых и промышленных испытаний других авторов. Получена сходимость результатов не менее 85 %.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

– XIV межд. мол. науч. конф. «Севергеоэкотех – 2013» (20 – 22 марта 2013 г., Ухта);

– XVI межд. мол. науч. конф. «Севергеоэкотех – 2015» (25 – 27 марта 2015 г., Ухта);

– межд. семинаре «Рассохинские чтения» (8-9 февраля 2013 г., Ухта);

– межд. семинаре «Рассохинские чтения» (5-6 февраля 2015 г., Ухта);

– X межд. уч. - науч. – практ. конф. «Трубопроводный транспорт - 2015» (Уфа, УГНТУ, 2015 г.);

– заседаниях молодежного Ученого совета филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта в период 2014-2018 г.;

– I Всеросс. конкурсе науч.-техн. печатных работ молодых ученых и специалистов (01 сентября – 15 декабря 2017 г., ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва);

– IX науч. – практ. конф. молодых работников ООО «Газпром трансгаз Ухта» (23 – 26 октября 2018 г., ООО «Газпром трансгаз Ухта», г. Ухта);

– VII Молод. межд. науч.- практ. конф. «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (30 октября – 03 ноября 2018 г., ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва).

Соответствие паспорту специальности.

Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», а именно области исследования по п.1. «Напряженное состояние и взаимодействие с окружающей средой трубопроводов, резервуаров и оборудования при различных условиях эксплуатации с целью разработки научных основ и методов прочностного, гидравлического и теплового расчетов нефтегазопроводов и газонефтехранилищ» 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».

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии соискателя в обработке и интерпретации экспериментальных данных по определению характеристик механических свойств металла труб, получении исходных данных и научных экспериментах по диагностированию вибрационного состояния газопроводов, в апробации результатов исследования на объектах газораспределительных станций, разработке технических решений для уменьшения вибраций.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 17 работ, из них 5 в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК Минобрнауки РФ, и 1 патент на изобретение РФ.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 128 страниц текста, 93 рисунка, 7 таблиц и список литературы из 84 наименований.

Содержание работы

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

В первой главе выполнен обзор и анализ состояния методов оценки и обеспечения работоспособности технологических трубопроводов газораспределительных станций, дан анализ методов снижения пульсаций давления газа в трубопроводах, раскрыта сущность и особенности развития повреждений трубопроводов ГРС в условиях воздействия интенсивных динамических нагрузок.

Исследованиями проблем динамического нагружения трубопроводов занимались Владиславлев А.П., Генкин Н.Д., Зарицкий С.П., Иголкин А.А., Клюкин И.И., Самарин А.А., Старцев Н.И., Шахматов Е.В., Шорин В.П., Якубович В.А., и другие.

Динамическое нагружение трубопроводов является следствием комплексного воздействия внутреннего рабочего давления перекачиваемой среды и вибраций, вызванной пульсирующим потоком среды. В качестве источников пульсаций среды в трубопроводах могут быть насосы, компрессоры, реактивные двигатели. Однако существует большой класс газотранспортных объектов, которые, не имея вращающихся элементов, тем не менее, имеют возмущения потока среды, которые рождают опасные уровни вибрации и шума. В частности, высокоскоростной поток газа на выходе клапана-регулятора на ГРС вызывает существенное увеличение уровня шума и вибраций, которые в ряде случаев превышают нормативно установленные значения.

Несмотря на большое число научных работ и существенный прогресс в достижении высоких качественных показателей устойчивости трубопроводов, подверженных динамическому нагружению, проблема уменьшения уровня их вибрационного состояния остается. Анализ последних работ этого направления [А.А. Иголкин, дис-я доктора тех. наук, Самара, 2014 г.] и [И.Б. Заяц, дис-я канд. тех. наук, Уфа, 2015 г.] показывает, что снижение интенсивности генерируемых при дросселировании газообразных сред, акустических колебаний высокой мощности, а также пульсаций давления в потоке, достигается за счет использования делителей потока (сетчатых, лабиринтных), антишумовых клеток, перфорированных плунжеров, диффузоров.

Данные решения имеют следующие недостатки:

– Разделительные решетки, диафрагмы, картриджи ограничивают пропускную способность регулирующих устройств.

– Геометрические размеры делителей потока неизменны и конструкция не предусматривает какой-либо регулировки их пропускной способности, соответственно, можно предположить, что они наиболее эффективны в условиях постоянного расхода или для некоторого узкого диапазона расходов.

– Пропускная способность разделителей может снижаться вследствие засорения или обледенения.

В научно-технической литературе вопросы, касающиеся влияния динамического нагружения газа на состояние металла трубной обвязки ГРС, также не исследованы.

В таких условиях необходимо развитие методов оценки и обеспечения работоспособности технологических трубопроводов газораспределительных станций для повышения надёжности при эксплуатации.

Во второй главе выполнено экспериментальное исследование механических свойств металла трубопроводной обвязки ГРС, подверженной воздействию динамического нагружения от высокоскоростного потока газа.

При проведении капитального ремонта газораспределительной станции (ГРС) ООО «Газпром трансгаз Ухта» из технологической трубопроводной обвязки были отобраны фрагменты для изучения особенностей изменения свойств металла труб при длительной эксплуатации (37 лет). Для проведения сравнительной оценки были отобраны фрагменты металла из надземных трубопроводов:

- отрезок коллектора с подводными шлейфами на выходе из зала редуцирования ГРС, рабочее давление 1,2 МПа (фрагмент № 1);
- отрезок трубопровода на прямолинейном участке на входе в пылеуловитель, рабочее давление 2,8 МПа (фрагмент № 2).

Цель механических испытаний – оценка влияния длительного механического нагружения при эксплуатации технологических трубопроводов ГРС на изменение свойств металла труб. Фрагмент трубы № 2 подвергался воздействию более высокого квазистатического рабочего давления, фрагмент трубы № 1 - воздействию пульсирующего высокоскоростного потока газа после редуцирующего клапана-регулятора с меньшим внутренним рабочим давлением.

Из отобранных фрагментов металла труб изготовлены продольные и поперечные образцы для проведения механических испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84:

- полной толщины стенки трубы (образцы 1-1, 1-2);
- с наружной стороны трубы (образцы 1-3, 1-6);
- посередине толщины стенки трубы (образцы 1-4, 1-7);
- с внутренней стороны трубы (образцы 1-5, 1-8).

Для сравнительного анализа результатов испытаний использовались характеристики стали марки ст. 4.

Установлено, что у образцов металла из фрагмента № 1 (нумерация 1-1, 1-2 и т.д.) предел прочности меньше, чем у образцов металла из фрагмента № 2 (нумерация 2-1, 2-2 и т.д., рисунок 1, а). Данная тенденция свойственна 6 образцам из 8 образцов от каждого фрагмента, которая прослеживается и для условного предела текучести – 5 образцов из восьми. При этом, у 4-х образцов фрагмента № 1 значения условного предела текучести меньше требуемого осредненного сертифицированного значения 313 МПа (образцы 1-1, 1-2, 1-6 и 1-8).

Это означает, что воздействие динамической нагрузки, вызываемой высокоскоростным потоком газа на выходе линий редуцирования, приводит к деградации прочностных свойств металла труб, даже в условиях меньшего внутреннего рабочего давления газа в сравнении с условиями отсутствия динамической нагрузки.

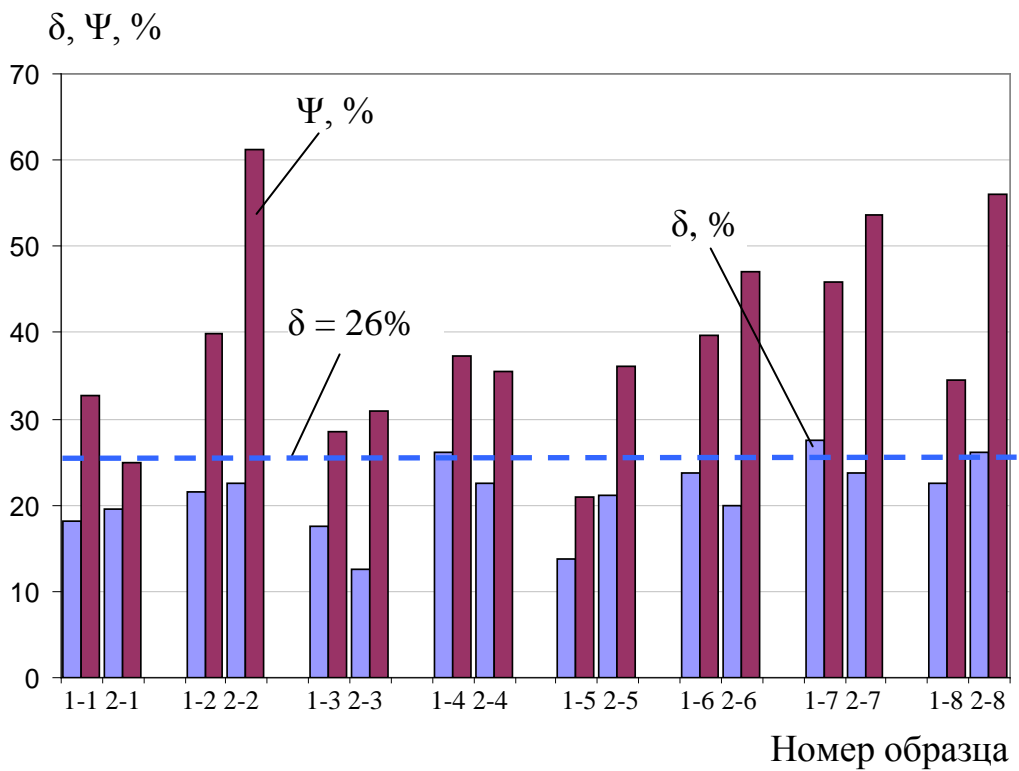
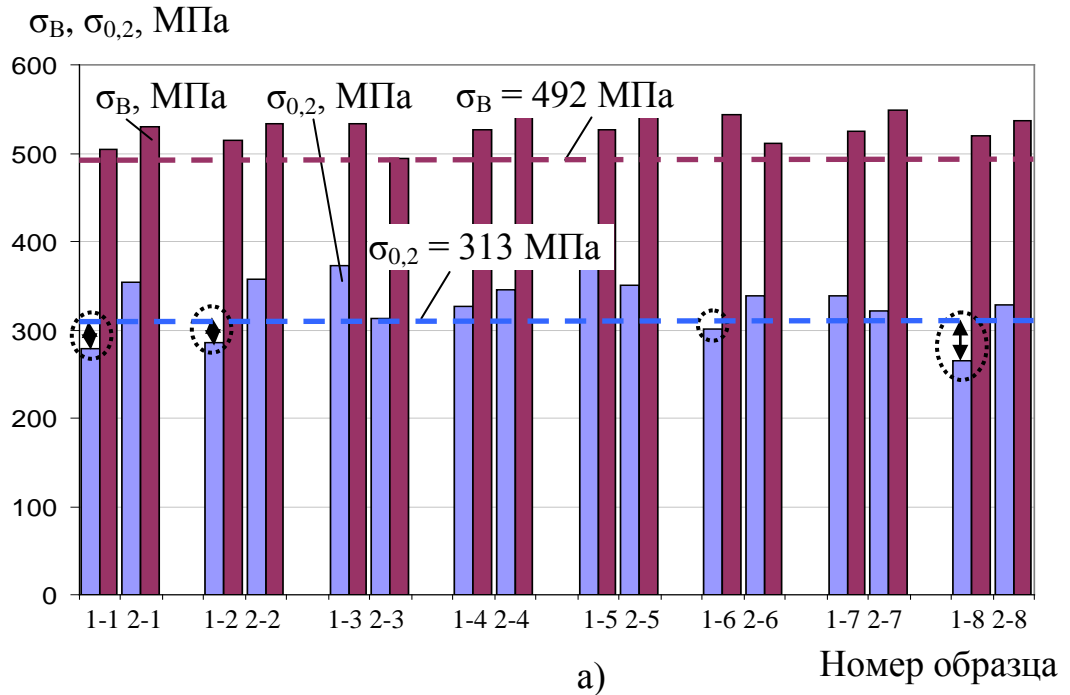


Рисунок 1 – Характеристики механических свойств металла труб ГРС: предел прочности и условный предел текучести (а), относительное удлинение и относительное сужение образцов после разрыва (б)

Характеристики пластических свойств, контролируемые относительным удлинением после разрыва образцов из обоих фрагментов металла, за исключением 2-х образцов из 16, меньше требуемого осредненного сертификатного значения 26 % (см. рисунок 1, б). Характерно, что минимальные значения относительного удлинения и относительного сужения после разрыва образцов принадлежат образцу 1-5, который примыкает к внутренней поверхности фрагмента № 1.

Таким образом, сделан вывод, что металл трубопровода ГРС, и высокого (2,8 МПа) и, в большей степени низкого давления (1,2 МПа) на участке за узлом редуцирования после 37 лет эксплуатации претерпевает ухудшение пластических свойств. При этом, максимальное снижение пластичности металла труб может быть вызвано возникновением динамического характера нагружения, при котором кольцевые напряжения, уже не носят квазистатический характер, а характеризуются наложением пульсирующей нагрузки от скоростного потока дросселируемого газа.

Исследованы зависимости параметров прочности от характеристик пластичности образцов металла трубопроводов ГРС, наиболее представительными из которых с высоким коэффициентом детерминации $R^2=0,82-0,9$ являются зависимости напряжения разрушения от относительного удлинения и сужения после разрыва образцов. При этом предел прочности при изменении характеристик пластичности металла остается постоянным, а условный предел текучести имеет некоторую тенденцию к уменьшению.

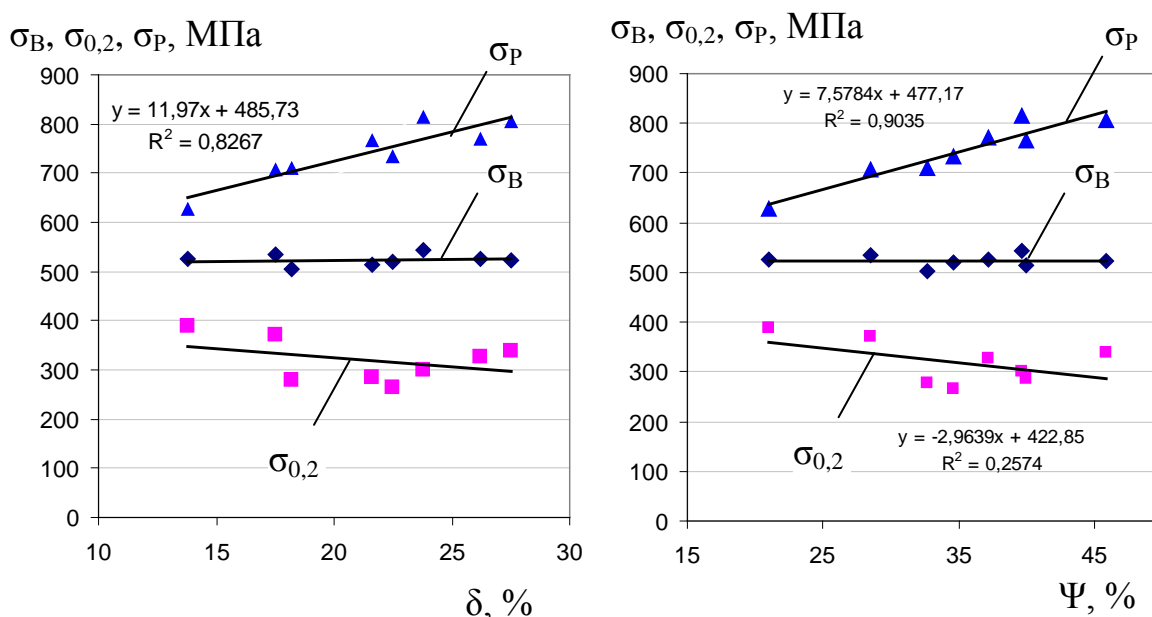


Рисунок 2 – Зависимости предела прочности, условного передела текучести и напряжения разрушения от относительного удлинения после разрыва (а) и относительного сужения (б) из фрагмента металла № 2

В третьей главе выполнено расчетное моделирование процесса высокоскоростного перетока газа через проточную часть симметричного клапана-регулятора и фрагмент участка трубопроводной обвязки линии редуцирования ГРС.

Определены скоростные режимы потока газа, проходящего через участок низкого давления линии редуцирования при проектном и фактическом режимах работы по условию обеспечения заданной производительности ГРС (таблица 1).

Таблица 1 – Режимы работы ГРС

| Параметр | Значение | |
|--|----------|----------|
| | Проект | Факт |
| Давление на входе, МПа | 5,6 | 4,1 |
| Давление на выходе, МПа | 1,2 | 0,6 |
| Производительность, тыс. м ³ /час | 152 | 78 - 168 |
| Скорость потока, м/с | 25,0 | 55,9 |

В результате было установлено, что за счет несоответствия проектного и фактического режимов работы по давлению газа на выходе ГРС (1,2 МПа и 0,6 МПа соответственно) фактическая скорость потока сжатого газа на участке между регулятором давления и подземным коллектором (55 м/с), превышает предельно допустимую для трубопроводов ГРС (25 м/с) более чем в два раза.

Для построения расчетной модели были определены геометрические характеристики участка линии редуцирования газа. Построенная трехмерная модель, включала проточную часть клапана-регулятора РДУ-100-64 и расширяющийся канал, состоящий из двух патрубков диаметром 100 и 300 соединенных двумя последовательно установленными диффузорами (рисунок 3).

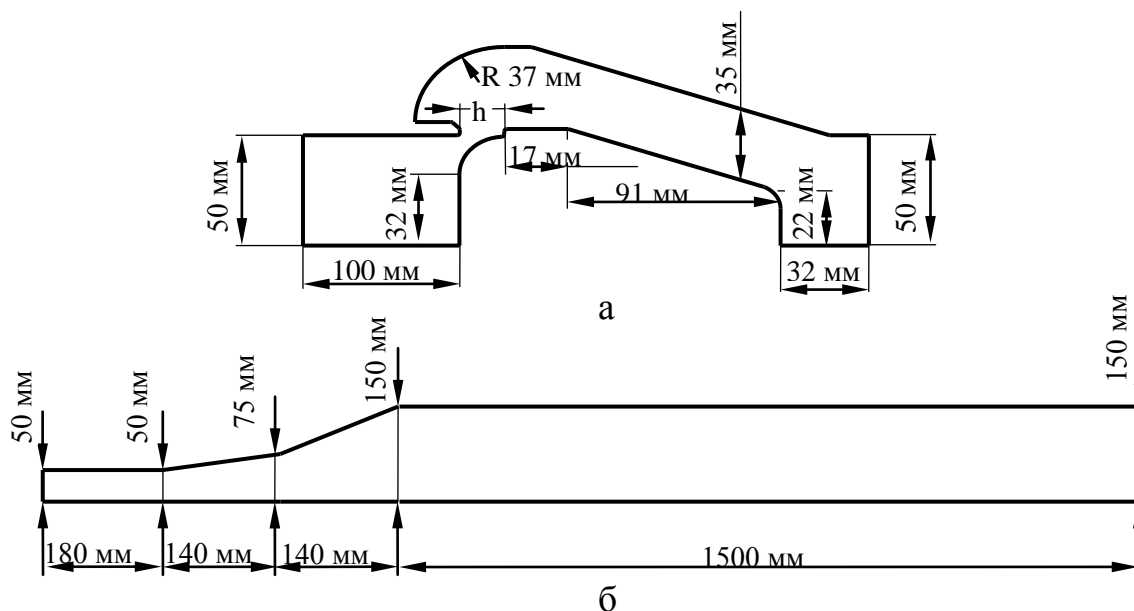


Рисунок 3 – Геометрические размеры расчетной области: проточная часть клапана-регулятора (а); начальная часть газопровода низкого давления (б)

Моделирование высокоскоростного потока газа в цилиндрическом канале переменного диаметра выполнялось с помощью расчетного комплекса Ansys

CFX, позволяющем решать задачи вычислительной газодинамики методом конечных элементов. Рассматривались два случая:

– ширина зазора между затвором и седлом затвора клапана-регулятора 3,5 мм, объемный расход $28 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$; средняя скорость потока на выходе канала 19 м/с;

– ширина зазора 4,5 мм, расход $40 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$; средняя скорость потока 27 м/с.

Результаты расчетного моделирования показали значительную неоднородность высокоскоростного газового потока по структуре, скорости, давлению, температуре.

Структура потока отличается наличием не менее трех вихревых зон, две из которых расположены в проточной части клапана-регулятора и одна – в диффузоре и начальной части второго прямолинейного участка канала (рисунок 4). Основные причины формирования вихревых областей - наличие глухих теневых зон в канале, резкое изменение направления и отражение высокоскоростных струй потока, а также недостаточно плавное расширение канала.

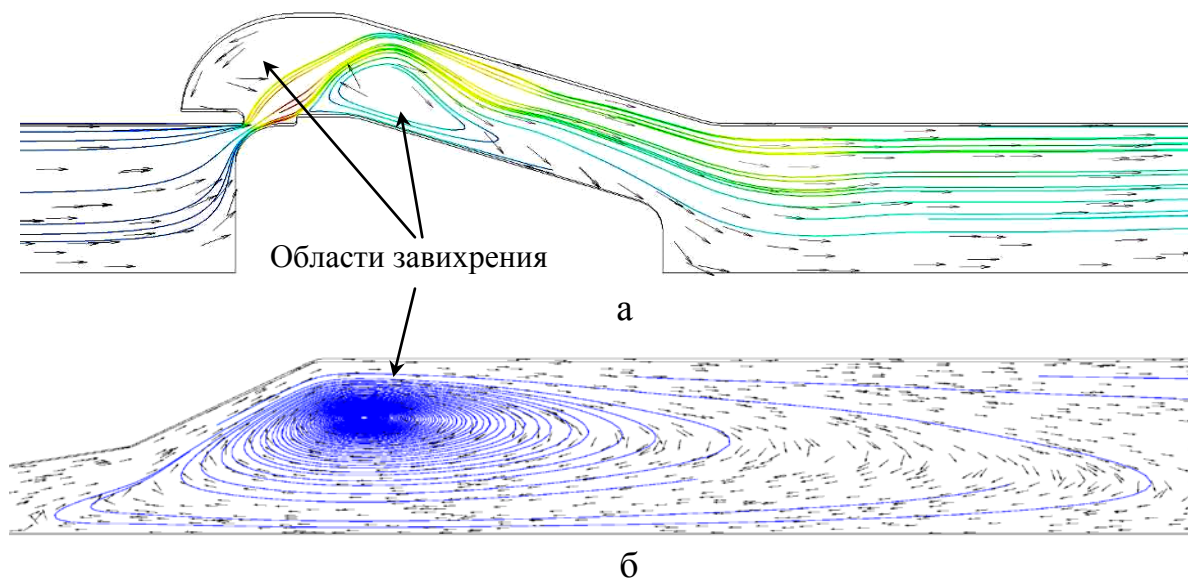


Рисунок 4 – Структура высокоскоростного потока при объемном расходе газа $40 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$

Были установлены следующие особенности распределения давления в высокоскоростном газовом потоке. На выходе из дросселирующего зазора давление в потоке составляет 0,85-1,1 МПа при объемном расходе $28 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и 0,9-1,3 МПа при объемном расходе $40 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ (рисунок 5).

В месте поворота потока (у стенки проточной области клапана-регулятора) давление снижается до 0,6-0,8 МПа. После поворота потока происходит снижение давления до 0,2 – 0,3 МПа и далее постепенный рост по длине канала до 0,65 МПа. Зоны пониженного давления (до 0,15 МПа) зафиксированы в центральной части первой и второй областей завихрения.

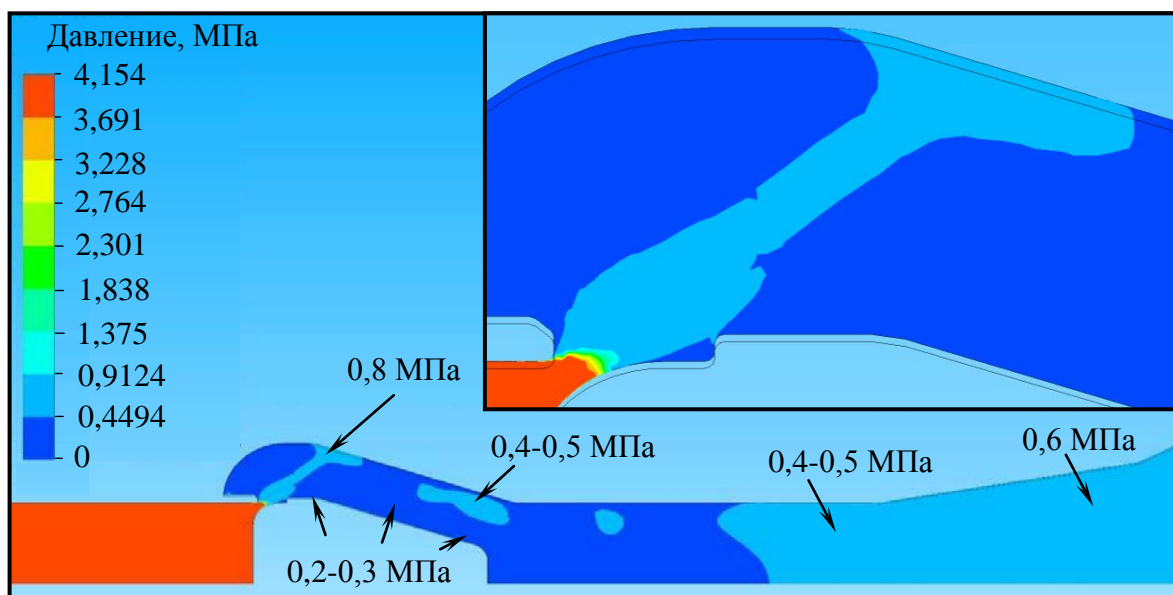


Рисунок 5 – Поле распределения давления в продольном сечении расчетной области при объемном расходе $40 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$

При объемном расходе $28 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$, пульсации давления составляют 0,04-0,07 МПа, с периодом одного колебания 0,009 – 0,011 с. Максимальные по амплитуде пульсации (0,06-0,07 МПа) наблюдаются в патрубке между клапаном-регулятором и первым диффузором. При объемном расходе $40 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ амплитуда пульсации давления составляет:

- в контрольных точках № 1-№ 7 от 0,1 до 0,35 МПа (рисунок 6);
- на участке между входом в первый диффузор и выходом из канала – от 0,04 до 0,1 МПа.

Анализ скоростного режима потока показывает следующее:

- продольная составляющая скорости потока газа в пределах проточной части клапана регулятора превышает скорость звука и достигает 450 м/с при объемном расходе $28 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и 550 м/с при объемном расходе $40 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$. Скорость противотока в вихревых зонах составляет от 120 до 450 м/с при объемном расходе $28 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и от 200 до 480 м/с при объемном расходе $40 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ (рисунок 7);

- на выходе клапана регулятора, при объемном расходе $28 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$, продольная скорость потока достигает 350 м/с, при этом скорость противотока в вихревых зонах не превышает 50 м/с. При объемном расходе $40 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$, продольная составляющая скорости основного потока достигает 550 м/с при скорости противотока в вихревых зонах от 40 до 70 м/с.

Установлены следующие особенности распределения температур в потоке газа. В случае, если температура газа на входе в клапан-регулятор составляет 40°C , среднее значение температуры газа за расчетный период на выходе канала будет составлять не более 19°C при объемном расходе $28 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и не более 18°C при объемном расходе $40 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$. В областях завихрения температура газа достигает отрицательных значений (от минус 3 до минус 8°C при объемном расходе $28 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и от минус 8 до минус 16°C при объемном расходе $40 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$).

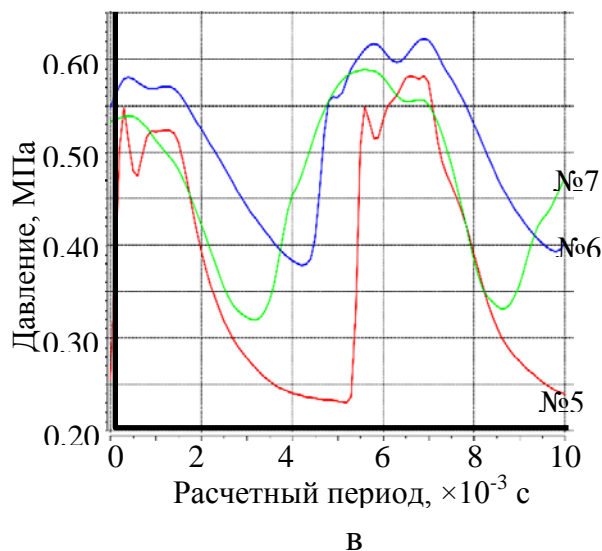
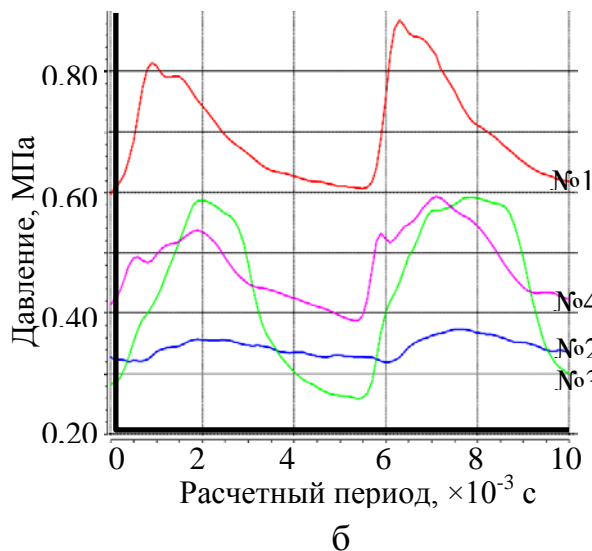
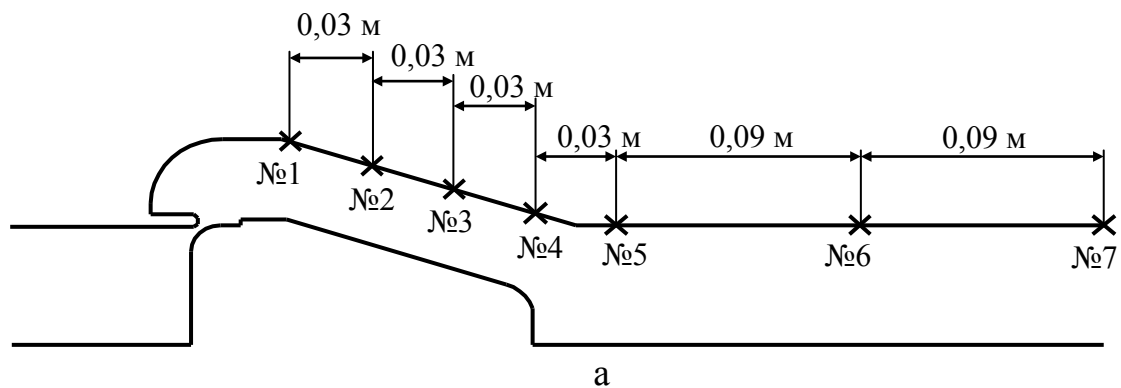


Рисунок 6 – Пульсации давления газа в проточной части клапана-регулятора при объемном расходе 40×10^3 м³/ч: а) фрагмент расчетной модели с контрольными точками; б) пульсации давления в точках №1-№4 (проточная часть клапана-регулятора; в) пульсации давления в точках №5-№7 (патрубок между клапаном-регулятором и первым диффузором)

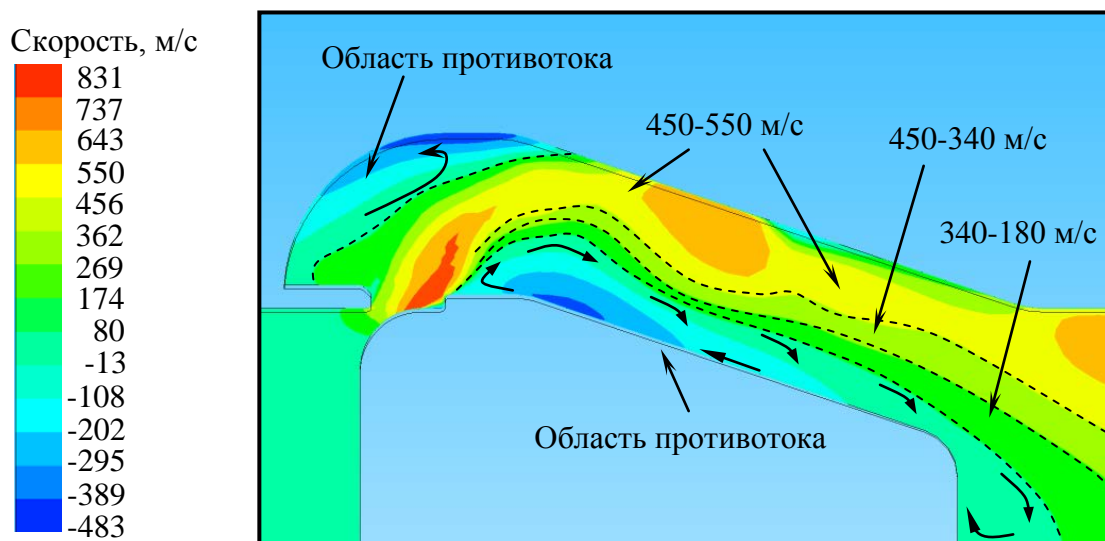
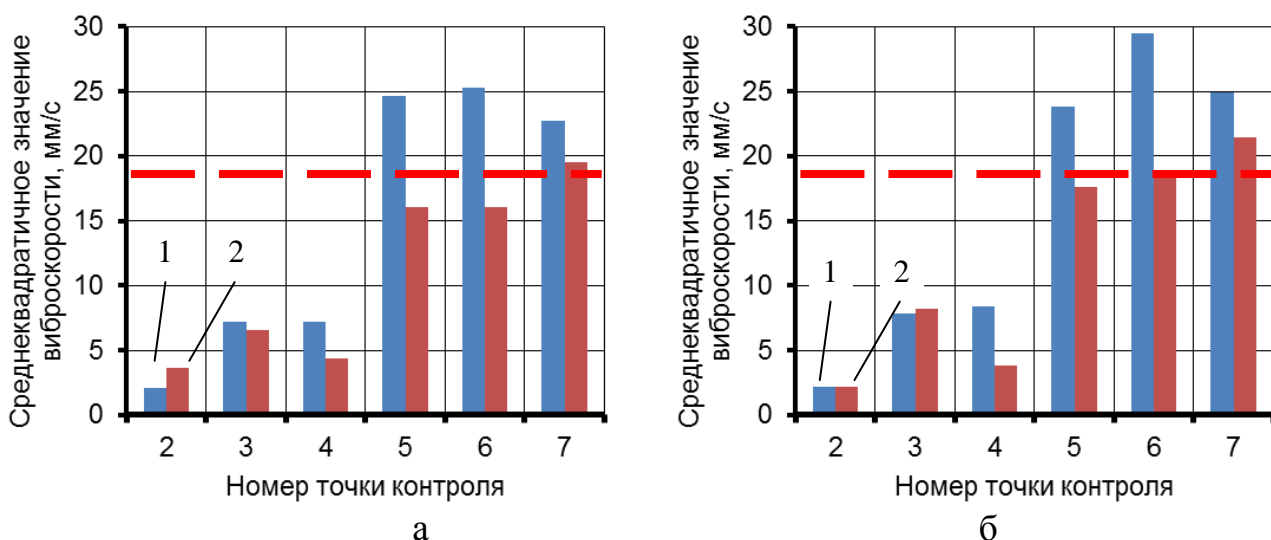


Рисунок 7 – Поле продольной составляющей скорости потока сжатого газа в проточной части клапана-регулятора при объемном расходе 40×10^3 м³/ч

В четвертой главе разработаны и обоснованы технические решения по снижению вибрации трубопроводов линии редуцирования ГРС. Методами вибродиагностики определены фактические значения параметров вибрации трубопроводной обвязки клапанов-регуляторов при обеспечении заданных расходов (до 150 тыс. м³/ч). Проведено расчетное моделирование и оценка особенностей отклика трубопроводной системы на воздействие периодически изменяющейся нагрузки (внутреннего давления), полученные данные сопоставлены с результатами фактических измерений. Предложены и обоснованы методы снижения интенсивности пульсаций давления в проточной части клапана-регулятора.

Вибрационный контроль линий редуцирования газа ГРС показал, что на эксплуатационных режимах (120 - 150 тыс. м³/ч), измеренное среднеквадратичное значение виброскорости в контрольных точках на поверхности трубопроводов, расположенных после клапанов-регуляторов (точки № 5 - № 7, рисунок 8), значительно превышает предельно допустимое значение (18 мм/с). Предполагаемая причина вибрации трубопроводов - пульсация давления газа в проточной части и на выходе клапана-регулятора.



1 – линия редуцирования № 1; 2 – линия редуцирования № 2;

Рисунок 8 – Результаты измерений вибрации линий редуцирования ГРС «Эжва»: а) горизонтальная плоскость, расход 147000 м³/ч; б) вертикальная плоскость, расход 147000 м³/ч

Для оценки взаимосвязи между параметрами вибрации трубопроводной обвязки клапана-регулятора и интенсивностью пульсации давления высокоскоростного потока газа, проходящего через его проточную часть, была построена расчетная модель (рисунок 9), включающая фрагмент входного и выходного коллекторов, а также трубопроводную линию переменного диаметра с диффузорами, кранами, клапаном-регулятором и опорами.

В качестве области воздействия циклически изменяемой нагрузки (внутреннего давления) задавался участок редуцирования, включающий проточную часть клапана-регулятора, патрубков внутренним диаметром 100 мм, и два последовательно установленных диффузора (100×150 мм и 150×300 мм).

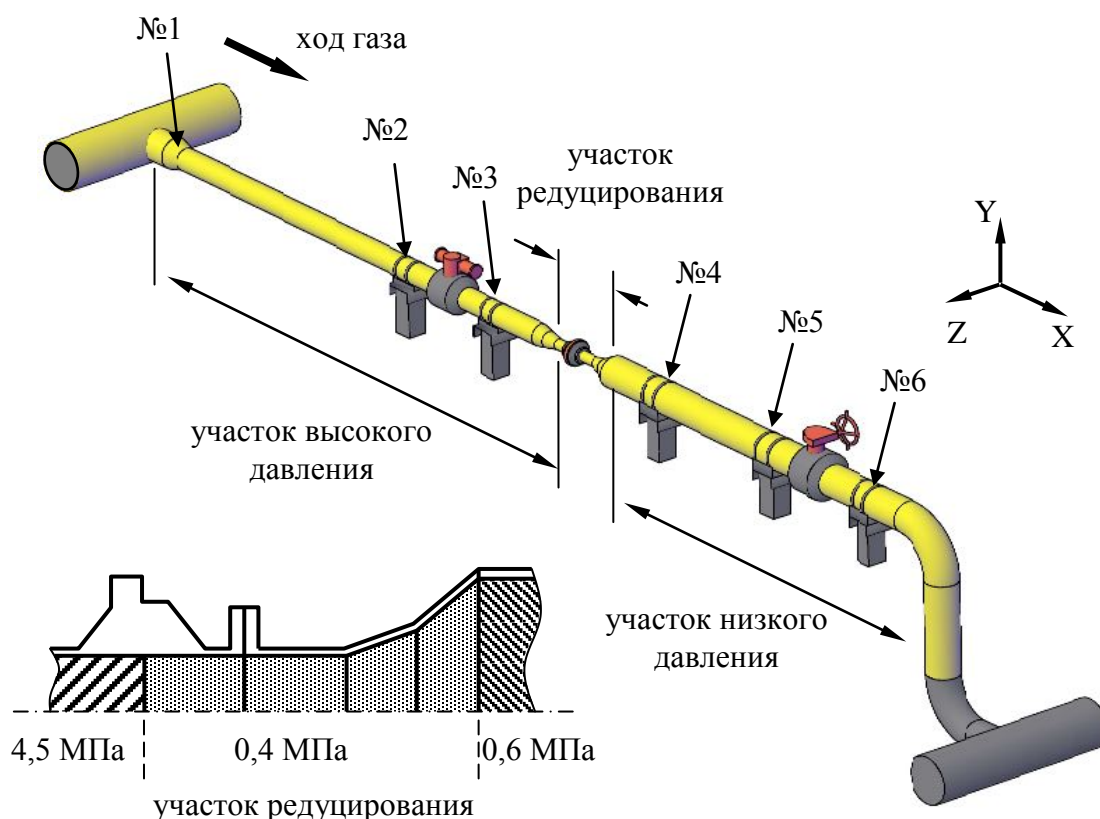


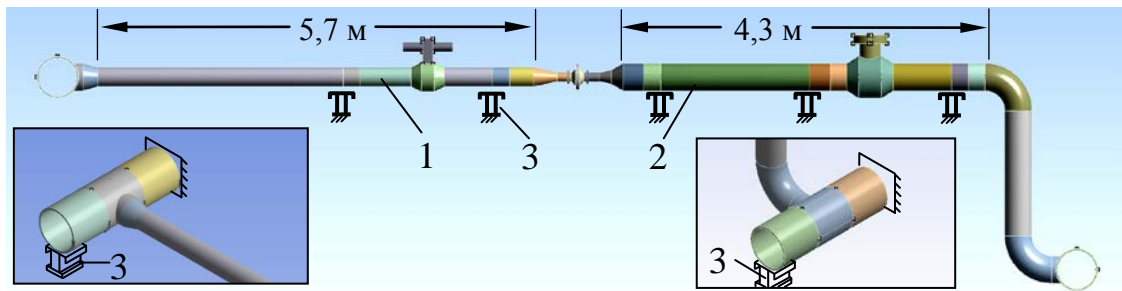
Рисунок 9 – Твёрдотельная модель линии редуцирования газа ГРС, схема расположения участка редуцирования в трубопроводной линии (№1 - №6 - порядковые номера точек контроля)

Определение особенностей формирования и оценка параметров вибрации трубопроводов линии редуцирования газа ГРС выполнено расчетным методом в среде Ansys, с последовательным проведением:

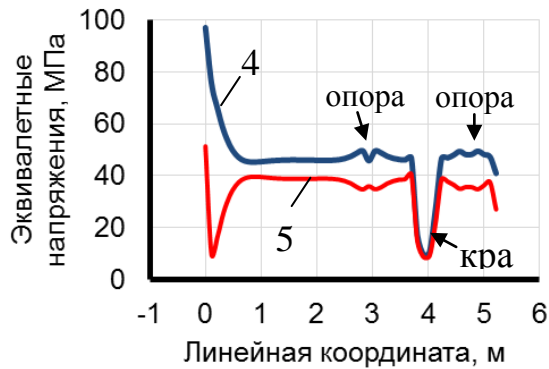
- статического структурного анализа;
- модального анализа - предназначенного для определения вибрационных характеристик расчетной модели трубопроводной линии в условиях воздействия статических нагрузок;
- гармонического анализа, предназначенного для определения отклика модели трубопроводной (предварительно напряженной) линии к воздействию гармонически изменяемой нагрузки (внутреннего давления).

Анализ статической прочности (рисунок 10) показал, что трубопроводы на участках высокого и низкого давления имеют значительный запас:

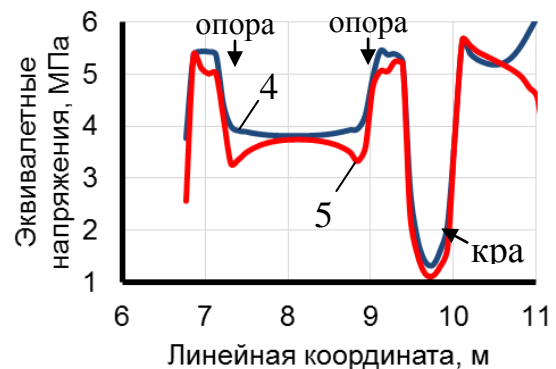
- эквивалентные напряжения стенок труб участка высокого давления ниже предела прочности материала в 5 - 10 раз;
- на участке низкого давления максимальные эквивалентные напряжения стенок труб ниже предела прочности материала в 70 раз.



а



б



в

1 – участок высокого давления; 2 – участок низкого давления; 3 – скользящая опора; 4 – внешняя поверхность стенки; 5 – внутренняя поверхность стенки
 Рисунок 10 – Результаты расчета механических напряжений стенок труб горизонтальных участков линии редуцирования газа ГРС: а) схема линии редуцирования; б) эквивалентные механические напряжения стенки труб участка высокого давления; в) эквивалентные механические напряжения стенки труб участка низкого давления

По результатам проведенного модального анализа были определены формы собственных колебаний линии редуцирования газа. Было установлено, что при низких частотах колебаний (до 450 Гц), для труб линии редуцирования характерна деформация оси и сохранение геометрии поперечного сечения. При частотах от 450 до 800 Гц наблюдается смешанная деформация, как оси, так и сечения линии (рисунок 11). При частоте выше 800 Гц, колебания сопровождаются деформацией сечения труб с сохранением формы оси линии.

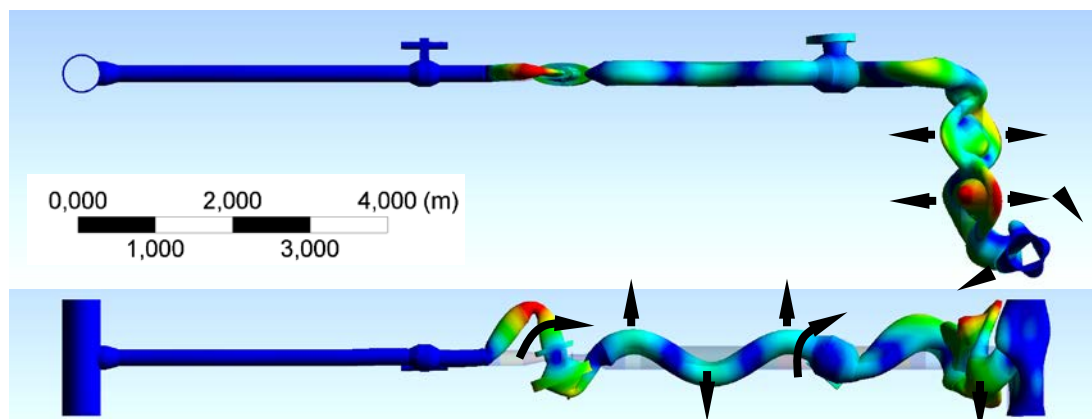
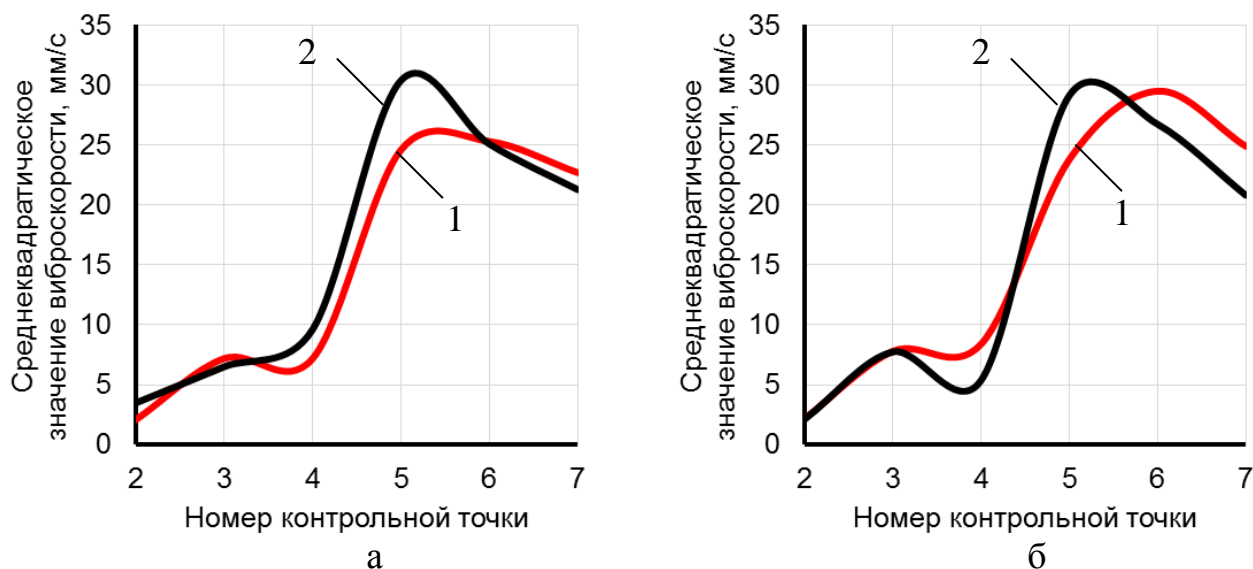


Рисунок 11 – Вибрационная деформация (форма колебаний) трубопроводной линии при частоте собственных колебаний 656,7 Гц

Проведенный гармонический анализ показал адекватность принятой расчетной модели. Установлено, что при частоте пульсации давления 610 Гц, 740 Гц и 760 Гц, расчетные среднеквадратические значения виброскорости в контрольных сечениях модели (в горизонтальной и вертикальной плоскостях) соответствуют фактическим данным (рисунок 12).



Среднеквадратичное значение виброскорости: 1 - фактическое 2 – расчетное

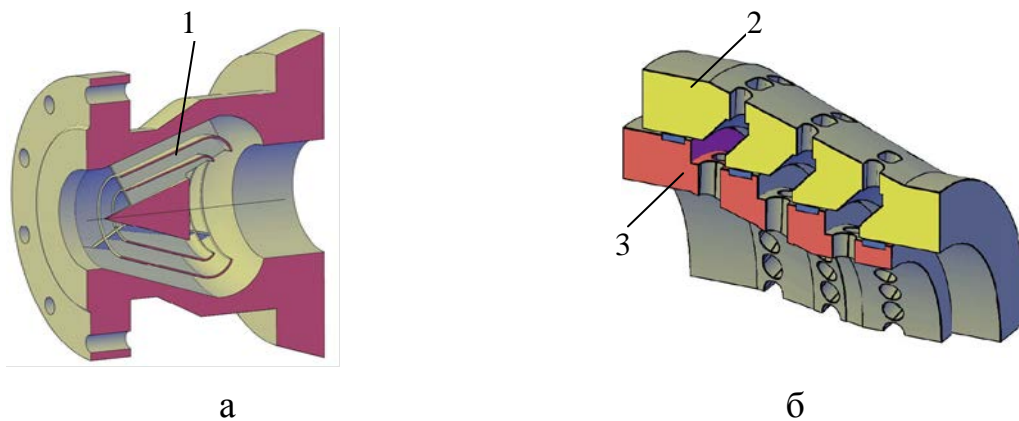
Рисунок 12 – Фактические и расчетные среднеквадратические значения виброскорости в контрольных точках линии редуцирования газа ГРС в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях при частоте пульсации давления на участке редуцирования 610 Гц

По результатам расчетного моделирования, подтвержденным фактическими данными вибрационного контроля, была установлена и подтверждена основная причина вибрации труб линии редуцирования газа ГРС – пульсации давления газа в проточной части клапана регулятора и начальной части участка низкого давления, обусловленные нестабильностью потока, выражаемой, в том числе, в интенсивном вихреобразовании. Для снижения вибрации трубопроводов были предложены следующие решения по стабилизации потока газа:

1) Размещение в проточной части клапана-регулятора разделительных решеток или сеток (рисунок 13, а).

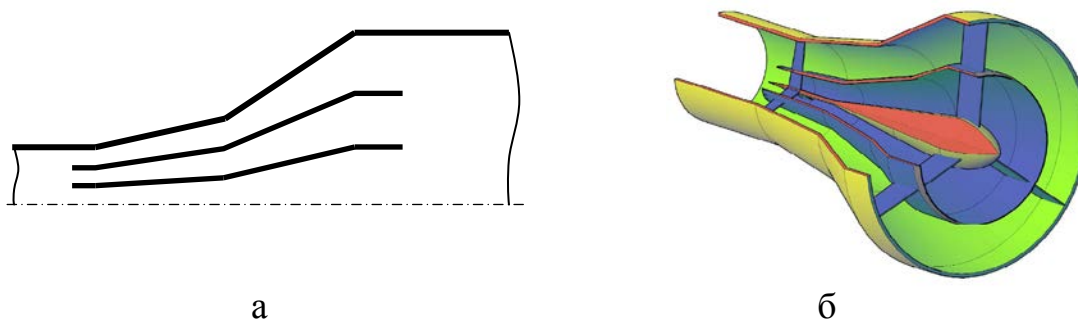
2) Изменение конструкции затвора для стабилизации потока за счет его разделения при дросселировании (дросселирование происходит через несколько зазоров, ширина каждого зазора регулируется, см. рисунок 13, б).

3) Изменение геометрии проточной части клапана-регулятора с вводом разделяющих стенок и профилирующих лопаток (рисунок 14).



1 - разделительная стенка; 2 - неподвижная часть затвора;
3 - подвижная часть затвора;

Рисунок 13 – Технические решения по стабилизации высокооборотного потока газа в проточной части клапана регулятора: а) оптимизация конструкции затвора для разделения потока при дросселировании; б) установка разделительных стенок



1 - неподвижная часть затвора; 2 - подвижная часть затвора;
3 - разделительная стенка

Рисунок 14 – Технические решения по стабилизации высокооборотного потока газа в линии редуцирования: а) схема размещения разделительных стенок в в диффузоре; б) общий вид диффузора с разделительными стенками

Анализ эффективности предлагаемых решений по оптимизации конструкции линии редуцирования проведенных исследований показывает следующее:

- рассматриваемые решения по оптимизации конструкции клапана-регулятора обеспечивают снижение интенсивности пульсаций давления газа в потоке. В используемой расчетной модели максимальные по амплитуде колебания зафиксированы в пределах контрольного сечения, расположенного между первым и вторым диффузором. При объемном расходе $40 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ амплитуда колебаний составляет 0,08 МПа, что в 4,4 раза ниже, чем в исходном варианте (0,35 МПа без разделения потока), период одного колебания составляет 0,01 с (рисунок 15);

- имеет место значительное (с 0,2 МПа до 0,001 МПа) снижение интенсивности колебаний давления в пределах проточной части клапана-регулятора;

- скорость потока на выходе из клапана-регулятора составляет 310 – 350 м/с, при этом распределение скорости в пределах поперечного сечения достаточно равномерное, вихревые зоны устранены полностью (рисунок 16).

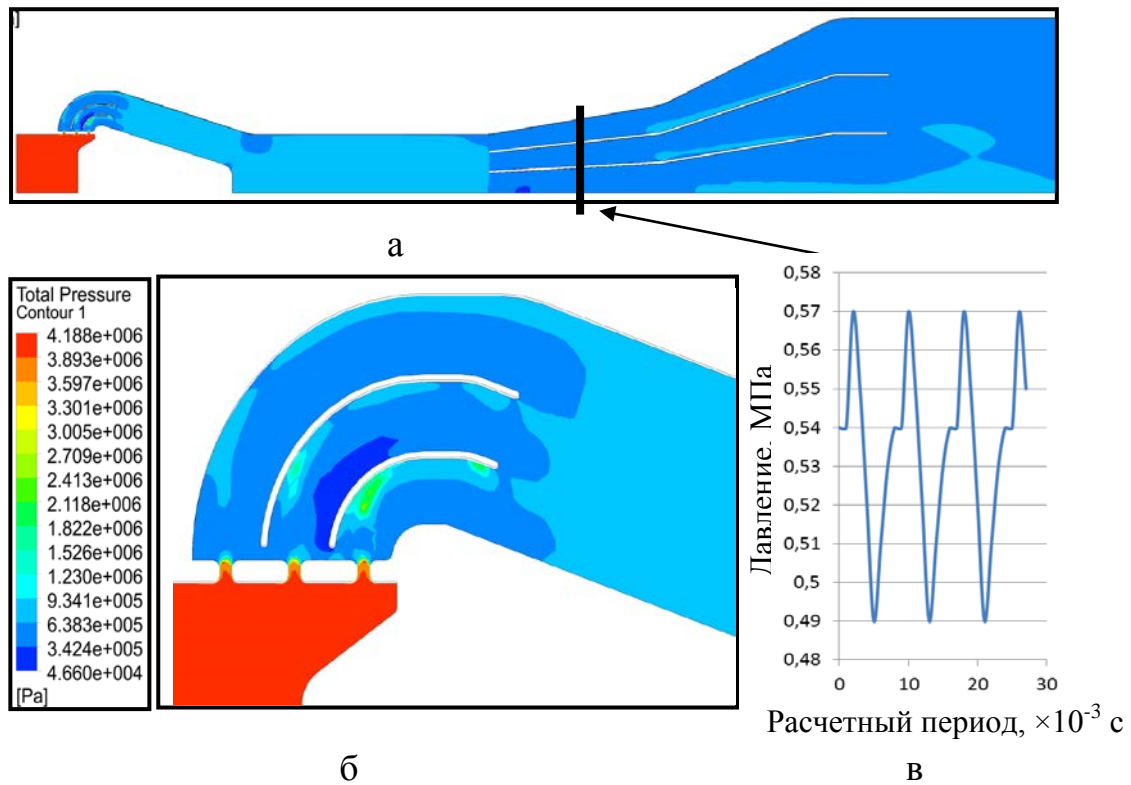


Рисунок 15 – Поле распределения давления в потоке (а, б), пульсация давления в диффузоре (в) при наличии разделительных стенок

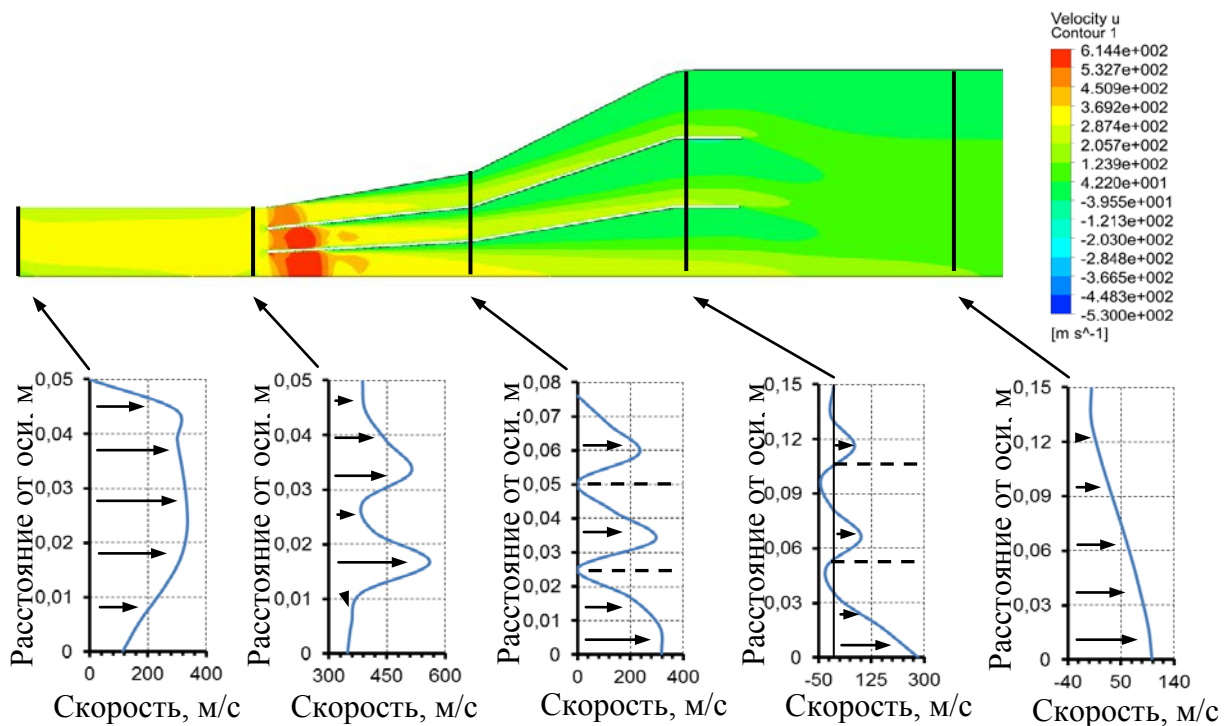


Рисунок 16 – Продольная составляющая скорости потока в заданных контрольных сечениях

Основные выводы:

1. Выполнен анализ вибрационного состояния газопроводов ГРС, определены возможные причины превышения допустимого уровня вибрации. Выполнен обзор устройств снижения вибраций и интенсивности пульсаций давления газа в трубопроводах, основанных на применении в промышленных образцах регуляторов различных устройств разбиения потока, которые характеризуются высокими гидравлическими сопротивлениями и не применимы в условиях высоких расходов на ГРС.

2. Проведена экспериментальная оценка характеристик механических свойств металла труб газопроводов газораспределительной станции, показывающая, что металл трубопровода низкого давления (1,2 МПа) после 37 лет эксплуатации на участке за узлом редуцирования претерпевает ухудшение пластических свойств по сравнению с металлом трубопровода с более высоким внутренним рабочим давлением (2,8 МПа), что объясняется возникновением динамического характера нагружения по действием вибраций, при котором кольцевые напряжения суммируются с пульсирующей нагрузкой от высокоскоростного потока дросселируемого газа.

3. Выполнен расчет интенсивности вибрационных нагрузок в газопроводе редуцирования газа, работающем с перегрузкой до 35 % по объемному расходу газа, показывающий превышение допустимых пороговых уровней скорости потока более двух раз. Расчетно-экспериментальная проверка применения стандартных процедур снижения уровня вибраций путем восстановления работоспособности опор трубопроводной обвязки ГРС не привела к восстановлению уровня вибраций в нормативно допустимых пределах.

4. Выполнено расчетное моделирование скоростных и силовых параметров нагружения трубопроводной обвязки ГРС для процесса истечения газа из области высокого в область низкого давления через канал сложной формы на участке клапана-регулятора, с применением программного комплекса Ansys CFX. Построена трехмерная модель проточной части линии редуцирования, определены граничные условия, модель турбулентности. Вибрации объяснены появлением пульсаций давления в проточной части клапана-регулятора и патрубке между клапаном-регулятором и диффузором с частотой более 100 Гц при расходе $28 \cdot 10^3$ м³/ч и более 200 Гц и амплитудой 0,3-0,4 МПа при расходе $40 \cdot 10^3$ м³/ч. Поток в пределах расчетной области имеет три области завихрения.

5. Усовершенствован метод снижения вибраций в газопроводах ГРС, заключающийся в профилировании высокоскоростного потока газа, разработаны новые технические решения по его стабилизации с помощью разделительных стенок, размещаемых в проточной части клапана-регулятора и диффузоре, а также за счет разделения потока при дросселировании через несколько регулируемых зазоров. Предложенные решения проверены путем расчетного моделирования, показавшим, что реализация указанных технических решений позволяет снизить пульсации давления в 3-3,5 раза, полностью устранить области завихрения в клапане и снизить размеры областей завихрения в диффузоре.

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

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. П.А. Кузьбожев, С.В. Петров Модернизация узлов редуцирования на газораспределительной станции с целью снижения шума от высокоскоростного потока газа // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2014. – № 3. – С. 36-39.
2. П.А. Кузьбожев, С.В. Петров Анализ звуковой мощности шума от высокоскоростного потока сжатого газа на газораспределительной станции // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2014. – № 3. – С. 95-101.
3. П.А. Кузьбожев, С.В. Петров Вибрации газопровода от высокоскоростного потока сжатого газа при редуцировании на газораспределительной станции // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2014. – № 4. – С. 68-72.
4. П.А. Кузьбожев, И.Ю. Быков, И.Н. Бирилло, С.В. Петров Исследование взаимосвязи твердости и характеристик механических свойств металла трубопроводов газораспределительной станции после продолжительной эксплуатации // Инженер – нефтяник. – 2015. – №1. – С. 48-50.
5. П.А. Кузьбожев, И.Ю. Быков, И.Н. Бирилло Исследование характеристик механических свойств металла труб газораспределительной станции после продолжительной эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 2. – С. 86-91.

Свидетельства и патенты

1. Пат. 2 666 077 Российская Федерация, МПК G05D 16/06. Регулятор давления газа / Шишкин И.В., Кузьбожев П.А., Бирилло И.Н.; Патентообладатель ООО «Газпром ВНИИГАЗ» № 2017120692; заявл. 13.06.2017; опубл. 05.09.2018 Бюл. № 25 – 8 с. с ил.

Статьи в научно-технических сборниках и других изданиях

1. П.А. Кузьбожев Расчет колебаний газопровода при различных скоростях потока газа на участке редуцирования газораспределительной станции // В сб. докл. XIV межд. мол. науч. конф. «Севергеоэкотех – 2013» (20 – 22 марта 2013 г., Ухта) ч. 2. - Ухта: УГТУ, 2013. - С. 217–220.
2. П.А. Кузьбожев Увеличение звуковой мощности шума, как фактор ухудшения условий работы обслуживающего персонала газораспределительной станции // В сб. докл. XIV межд. мол. науч. конф. «Севергеоэкотех – 2013» (20 – 22 марта 2013 г., Ухта) ч. 4. - Ухта: УГТУ, 2013. - С. 252–255.
3. П.А. Кузьбожев, М.П. Посмак Расчет уровней звуковой мощности шума от высокоскоростного потока сжатого газа при дросселировании // В сб. докл. межд. семинара «Рассохинские чтения» (8 – 9 февраля 2013 г., Ухта). - ч.2 / под ред. Н.Д. Цхадая – Ухта: УГТУ, 2013. – С. 6-13.
4. П.А. Кузьбожев, М.П. Посмак Расчет вибраций газопровода, возникающих от высокоскоростного потока сжатого газа на участке редуцирования га-

зораспределительной станции // В сб. докл. межд. семинара «Рассохинские чтения» (8 – 9 февраля 2013 г., Ухта). - ч.2 / под ред. Н.Д. Цхадая – Ухта: УГТУ, 2013. – С. 13-19.

5. П.А. Кузьбожев, И.Н. Бирилло Обоснование применения демпферных опор, снижающих вибрации на технологических трубопроводах ГРС // В сб. докл. межд. семинара «Рассохинские чтения» (5-6 февраля 2015 г., Ухта). - ч.2 / под ред. Н.Д. Цхадая – Ухта: УГТУ, 2015. – С. 37-40.

6. П.А. Кузьбожев, И.Н. Бирилло Анализ нарушений работоспособности опор технологических трубопроводов газораспределительных станций при эксплуатации // В сб. докл. межд. семинара «Рассохинские чтения» (5-6 февраля 2015 г., Ухта). - ч.2 / под ред. Н.Д. Цхадая – Ухта: УГТУ, 2015. – С. 40-43.

7. П.А. Кузьбожев, И.Н. Бирилло Исследование влияния высокоскоростного потока сжатого газа на пластические свойства металла трубопровода газораспределительной станции // Матер. X межд. уч.-науч.-практ. конф. «Трубопроводный транспорт - 2015» / ред. кол.: Р.Н. Бахтизин: и др. - Уфа: УГНТУ, 2015. - С. 132-133.

8. П.А. Кузьбожев, И.Н. Бирилло Сравнительная оценка изменения механических свойств металла трубопроводов высокого и низкого давления газораспределительной станции // Матер. X межд. уч.-науч.-практ. конф. «Трубопроводный транспорт - 2015» / ред. кол.: Р.Н. Бахтизин: и др. - Уфа: УГНТУ, 2015. - С. 133-135.

9. П.А. Кузьбожев Опоры технологических трубопроводов газораспределительных станций, классификация и виды нарушений // В сб. докл. XVI межд. мол. науч. конф. «Севергеоэкотех – 2015» (25 – 27 марта 2015 г., Ухта) ч. 4. - Ухта: УГТУ, 2015. - С. 96-99.

10. П.А. Кузьбожев Особенности применения демпферных опор на трубопроводах газораспределительных станций // В сб. докл. XVI межд. мол. науч. конф. «Севергеоэкотех – 2015» (25 – 27 марта 2015 г., Ухта) ч. 4. - Ухта: УГТУ, 2015. - С. 188-191.

11. П.А. Кузьбожев, И.Н. Бирилло, И.В. Шишкин Исследование влияния и характера динамического нагружения технологической трубопроводной обвязки газораспределительной станции // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. Электрон. науч. журн. - 2018. - С.5-10. URL: <http://resteo.ru/birillo-14/> (дата обращения: 02.04.2019).

Подписано к печати __.____.2019 г.

Заказ № ____

Объем 1,5 п.л. Формат бумаги А5

Тираж 100 экз.

Отпечатано в филиале ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта
По адресу 169300, г. Ухта, ул. Севастопольская, 1а, тел. 751685