

На правах рукописи



Акчермушев Владимир Васильевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ
НАДЗЕМНОГО ЗИГЗАГООБРАЗНО УЛОЖЕННОГО ТРУБОПРОВОДА**

Специальность 2.8.5. – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа – 2023

Работа выполнена на кафедре «Проектирование и строительство объектов нефтяной и газовой промышленности» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент
Кантемиров Игорь Финсурович

Официальные оппоненты:

Сенцов Сергей Иванович

доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина»/ кафедра
сооружения и ремонта
газонефтепроводов и хранилищ/
профессор

Закирьянов Марс Васильевич

кандидат технических наук,
ООО «Газпром трансгаз Уфа»/ служба
по управлению техническим состоянием
и целостностью объектов
газотранспортной системы Инженерно-
технического центра/ начальник службы

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Ухтинский
государственный технический
университет»

Защита диссертации состоится «18» мая 2023 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.428.03 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат диссертации разослан «__»

2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

На современном этапе развития трубопроводных систем нефтегазовой отрасли проектирование и строительство новых трасс магистральных трубопроводов все больше затрагивает отдаленные территории и охватывает сложные климатические и природные условия. Наиболее приемлемым конструктивным вариантом при таких условиях строительства с точки зрения прочности и надежности является применение надземных участков трубопроводов с компенсацией продольных деформаций.

Обеспечение прочности труб магистральных газонефтепроводов является комплексной задачей, которая решается на стадиях проектирования, строительства, эксплуатации и ремонта. Проектные решения трубопроводов принимаются с учетом допустимых их продольно-поперечных перемещений. В то же время чрезмерные отклонения от проектного положения трубопровода при его эксплуатации могут нарушить нормальное функционирование трубопровода или привести к отказу. Несоответствие конструктивных решений надземных трубопроводов их действительным условиям эксплуатации может привести к возникновению недопустимых деформаций и напряжений в трубопроводе.

Одной из конструктивных схем прокладки с компенсацией деформаций служит зигзагообразная прокладка трубопровода, имеющая ряд достоинств по сравнению с другими видами компенсационных участков.

Вместе с тем, анализ конструкции и расчета на прочность труб зигзагообразной прокладки показывает, что не в полной мере учитываются характер взаимодействия трубопровода и опоры, а также особенности конструкции опор: отсутствует метод расчета на прочность с учетом сил трения между перемещающимся трубопроводом и опорой, а также расчеты выполняются без учета гнутаго отвода на вершине угла поворота зигзагообразного участка и без учета вертикальных перемещений между опорами.

Степень разработанности темы

Вопросами обеспечения прочности надземных трубопроводов, а также изучением напряженно-деформированного состояния различных конструктивных решений занимались Автахов З. Ф., Азметов Х.А., Айнбиндер А.Б., Аскарлов Р.М., Березин В.Л., Бородавкин П.П., Быков Л.И., Васильев Г.Г., Гумеров А.Г., Зарипов Р.М., Иванцов О. М., Камерштейн А.Г., Коробков Г.Е., Лисин Ю. В., Лунев Л.А., Магалиф В.Я., Петров И.П., Спиридонов В.В., Харионовский В.В., Шаммазов А.М., Ясин Э.М., зарубежные исследователи Roshko A., Reifel M. D., Masubuchi K. и другие. Значительный вклад в совершенствование методов проектирования и строительства надземных переходов трубопроводов с компенсацией продольных деформаций внесли научные труды сотрудников нефтегазовых вузов Уфы (УГНТУ), Москвы (РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина), Ухты (НИПИ нефти и газа УГТУ), Тюмени (ТИУ), Альметьевска (АГНИ), а также проектных организаций Гипроспецгаз, Гипротрубопровод, ВНИПИТрансгаз, Нефтегазпроект и других.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 2.8.5. – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»: научные основы системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования конструкций, прочностных, гидромеханических, газодинамических и теплофизических расчетов сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, подземных и наземных газонефтехранилищ, терминалов, инженерной защиты и защиты от коррозии, организационно-технологических процессов их сооружения, эксплуатации, диагностики, обеспечения системной надежности, механической и экологической безопасности (п. 2); научные основы создания эффективных технологических процессов, технологий, технических средств, материалов, специализированных машин, оборудования нефтегазоперекачивающих станций, энерго- и ресурсосберегающих

методов организации, оптимизации и управления технологическими процессами, реализуемыми в рамках жизненного цикла сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта (п. 3).

Цель работы – повышение эксплуатационной надежности и ресурса надземных зигзагообразно уложенных участков трубопроводов путем совершенствования метода расчета на прочность с учетом действительных условий эксплуатации, а также совершенствования конструктивных решений опорных частей.

Для достижения поставленной цели научных исследований решались следующие **задачи**:

1. Анализ существующих методик расчета напряженно-деформированного состояния надземного зигзагообразно уложенного участка трубопровода с учетом действительных условий их строительства и эксплуатации.

2. Разработка методики расчета параметров напряженно-деформированного состояния надземного зигзагообразно уложенного участка трубопровода с учетом усилия трения на опорах, радиуса гнутого отвода и вертикальных перемещений между опорами расчетно-экспериментальными исследованиями.

3. Разработка способа корректировки напряженно-деформированного состояния надземного зигзагообразно уложенного участка трубопровода с помощью применения усовершенствованной конструкции опорных частей.

4. Определение способов повышения прочности надземных зигзагообразно уложенных участков трубопроводов исходя из условий их проектирования, строительства и эксплуатации.

Научная новизна выполненной работы заключается в следующем:

1. Установлены и экспериментально подтверждены закономерности изменения максимальных продольных напряжений и изгиба действующего надземного зигзагообразно уложенного участка трубопровода в зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров, учитывающих усилие трения на опорах, радиус гнутого отвода на вершине угла поворота, вертикальные

перемещения между опорами, снижение продольного сжимающего усилия в трубопроводе при его продольно-поперечных перемещениях и, как следствие, изменяющих величину напряжений и перемещений до 2 раз.

2. Сформулирована и решена новая задача по снижению максимальных продольных напряжений $\sigma_{пр}$ до 6 раз и максимального изгиба v_{max} до 3 раз в надземном зигзагообразно уложенном участке трубопровода путем повышения коэффициента трения на опоре в вершине угла поворота в 4 раза при угле отклонения трубопровода от горизонтальной оси $\varphi = 15$ градусов и радиусе гнутого отвода $R = 40 \cdot D_H$.

3. Обоснованы условия эффективной корректировки напряженно-деформированного состояния надземного зигзагообразно уложенного участка трубопровода за счет использования усовершенствованной конструкции опор, позволяющей регулировать перемещения эксплуатируемого трубопровода в продольном и поперечном направлениях.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость результатов исследований заключается в разработке методики расчета напряженно-деформированного состояния надземных зигзагообразных участков трубопроводов, учитывающая все конструктивные и эксплуатационные параметры, соответствующие действительным условиям строительства и эксплуатации (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021665164).

Практическая значимость результатов исследований заключается в разработке способа снижения максимальных продольных напряжений в самом опасном сечении зигзагообразного участка трубопровода с помощью повышения коэффициента трения между трубопроводами и опорой, расположенной на вершине угла поворота.

Также разработана и запатентована усовершенствованная конструкция опорных частей для надземных трубопроводов (патент РФ №208410), позволяющая корректировать напряженно-деформированное состояние надземного зигзагообразно уложенного участка трубопровода за счет

регулирования перемещения эксплуатируемого трубопровода в продольном и поперечном направлениях.

Результаты диссертационных исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «УГНТУ» при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий по дисциплинам: «Строительство переходов и сложных участков газонефтепроводов»; «Строительство магистральных и промысловых трубопроводов»; «Ремонт и реконструкция газонефтепроводов»; «Современные технологии строительства и ремонта объектов систем трубопроводного транспорта» для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 21.03.01 и магистров 21.04.01 «Нефтегазовое дело», а также при проектировании объектов трубопроводного транспорта в ПАО «Сургутнефтегаз».

Методология и методы исследования

Решение поставленных задач осуществлялось теоретическими, расчетными и экспериментальными методами на основе известных в науке положений и подходов. Теоретические исследования выполнены с использованием методов строительной механики и математического анализа. Адекватность разработанной методики расчета подтверждалась с помощью компьютерного моделирования на современном лицензированном программном продукте Старт-Проф 04.85 R1. При планировании экспериментальных исследований использовались методы математической статистики, обработка результатов проводилась с помощью программного продукта Microsoft Excel. Разработанная методика расчета запрограммирована с помощью математического программного обеспечения MathCad 15.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная и подтвержденная с помощью расчетно-экспериментальных исследований методика расчета параметров напряженно-деформированного состояния зигзагообразного участка трубопровода с учетом усилия трения на опорах, радиуса гнутого отвода и вертикальных перемещений между опорами.

2. Разработанный способ корректировки напряженно-деформированного состояния надземного зигзагообразно уложенного участка трубопровода с помощью применения усовершенствованной конструкции опорных частей и разработанных аналитических зависимостей.

3. Уточненный метод расчета на прочность и способы ее повышения для надземных зигзагообразных участков трубопроводов исходя из условий их проектирования, строительства и эксплуатации.

Степень достоверности и апробации результатов

Достоверность результатов исследований обеспечена использованием современных методов строительной механики, сертифицированного программного комплекса Старт-Проф (версия 4.85 R1), основанный на методе сил и методе перемещений, а также математического программного обеспечения MathCad (версии 15.0), высокой степенью корреляции результатов аналитического расчета с результатами, полученными экспериментом и компьютерным моделированием.

Высокая степень корреляции между полученными экспериментальными и аналитическими результатами напряжений и изгибов обеспечена применением научно-обоснованных и стандартизированных методик, использованием установок и приборов с наибольшим классом точности, применением методов математической статистики при обработке данных с помощью программного продукта Microsoft Excel.

Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XV Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2020» (г. Уфа, 18-19 ноября 2020 г.); 72-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (г. Уфа, 2021 г.); XVI Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2021» (г. Уфа, 17-18 ноября 2021 г.); XIV Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники – 2021» (г. Уфа, 15-19 марта 2021 г.); Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы

транспорта и хранения углеводородных ресурсов при освоении Арктики и Мирового Океана» (г. Тюмень, 2-3 декабря 2021 г.).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 2 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, а также патент РФ и свидетельство на программу для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов, списка литературы и 2 приложений. Работа изложена на 142 страницах машинописного текста, включает 69 иллюстраций, 4 таблицы. Библиографический список включает 121 литературный источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика диссертационной работы: обоснована ее актуальность, сформулированы цели и задачи исследования, отражены их научная новизна и практическая значимость.

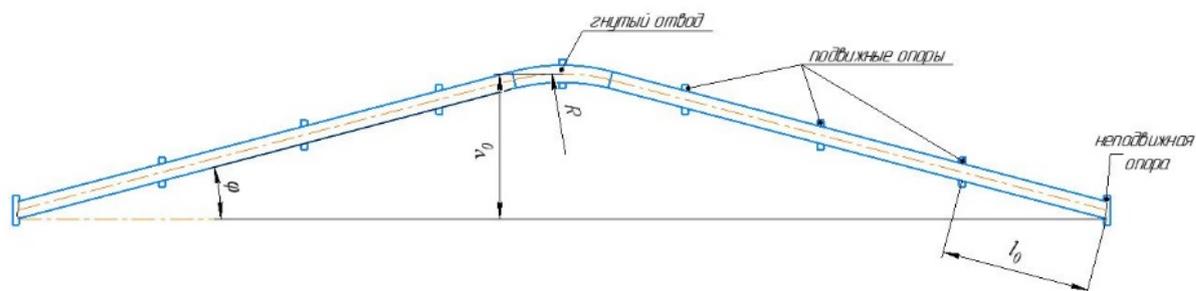
В первой главе диссертации приведен обзор существующих конструкций надземных переходов магистральных трубопроводов с компенсацией продольных деформаций. Рассмотрены примеры надземной зигзагообразной укладки надземных трубопроводов, установлены их основные преимущества по сравнению с другими видами компенсационных участков. Приведен обзор действующей на территории Российской Федерации нормативно-технической документации по расчету надземных участков магистральных трубопроводов на прочность, а также обзор существующих методик расчета напряженно-деформированного состояния надземных зигзагообразных участков трубопроводов. На основе анализа действующих нормативно-технических документов и используемых методов расчета на прочность приведена оценка их эффективности и выявлен ряд существенных недостатков, которые влияют на НДС участка трубопровода, на его безопасную эксплуатацию, на срок службы и ресурс, а именно: с конструктивной точки зрения не учтен радиус кривизны гнутого отвода на вершине угла поворота

и возможный вертикальный прогиб между опорами; с точки зрения эксплуатации не учтено усилие трения трубопровода на опорах.

С помощью расчета на прочность надземного зигзагообразного участка трубопровода с заданными геометрическими, конструктивными и эксплуатационными параметрами в программном комплексе Старт-Проф 4.85 R1 доказано существенное влияние неучтенных параметров на величину максимальных суммарных продольных напряжений и изгиба надземного участка трубопровода.

В связи с вышесказанным, были определены цель и основные задачи диссертационных исследований.

Во второй главе проведены аналитические исследования напряженно-деформированного состояния надземных зигзагообразно уложенных участков трубопроводов на опорах с учетом коэффициента трения трубопровода на опорах, радиуса гнутого отвода на вершине участка и вертикальных перемещений между опорами (Рисунок 1).



φ – угол отклонения трубопровода от горизонтальной оси; R – радиус гнутого отвода; v_0 – вылет участка трубопровода; l_0 – расстояние между опорами

Рисунок 1 – Схема зигзагообразного участка надземного трубопровода в горизонтальной плоскости между неподвижными опорами

На неподвижных опорах трубопровод жестко защемлен от продольных и поперечных перемещений. Между неподвижными опорами имеются опоры, в которых трубопровод имеет возможность продольного и поперечного перемещения. При этом между перемещающейся поверхностью контакта трубы и неподвижной площадью контакта опоры действует сила трения. Соединение труб

на вершине угла поворота конструктивно выполнено с применением гнutoго отвода радиусом кривизны R . Вершина угла поворота участка трубопровода перемещается только перпендикулярно продольной оси трубопровода. Трубопровод находится под воздействием положительного температурного перепада Δt и давления в полости трубопровода p , которые создают эквивалентное суммарное продольное сжимающее усилие N_0 , вычисляемое по СП 36.13330.2012. Сопротивление изгибу трубопровода в продольном и поперечном направлениях оказывает жесткость трубы на изгиб, а также силы трения на опорах. В процессе перемещения трубопровода начальное продольное усилие N_0 снижается до равновесного N .

Решением дифференциального уравнения изгиба трубопровода под действием продольного сжимающего усилия получены расчетные формулы для оценки напряженно-деформированного состояния надземного зигзагообразного участка трубопровода с учетом усилия трения на опорах $P = q \cdot l_0 \cdot f_T$, радиуса гнutoго отвода на вершине угла поворота R и вертикального прогиба между опорами v_1 . Здесь q – вес трубопровода единичной длины, включающий вес металла труб, изоляции и перекачиваемого продукта; f_T – коэффициент трения между поверхностями.

Максимальный изгиб трубопровода на вершине угла поворота определяется как

$$v_{max} = \bar{v}_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{EI}{q \cdot f_T} \cdot tg^4 \varphi}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости металла трубы; I – осевой момент инерции поперечного сечения трубы.

Выражение для вычисления изгибающего момента на вершине угла поворота

$$M = \bar{M} \sqrt[3]{q \cdot f_T (EI tg \varphi)^2}. \quad (2)$$

Равновесное усилие N после перемещения участка трубопровода определяется как

$$N = \bar{N} \sqrt[3]{EI \left(\frac{q \cdot f_T}{tg \varphi}\right)^2}. \quad (3)$$

Безразмерные параметры \bar{v}_0 , \bar{M} , \bar{N} и α вычисляются в зависимости от безразмерного параметра a длины изогнутого участка трубопровода при его изгибе и параметра a_0 радиуса гнутого отвода. Здесь $\alpha = \bar{N}^{1,5}$.

Параметры напряженно-деформированного состояния исследуемого участка трубопровода зависят от количества участков между неподвижными опорами n и расстояния между опорами l_0 .

Для исследуемой расчетной схемы надземного трубопровода между неподвижными опорами имеются восемь участков протяженностью l_0 каждого участка. С учетом силы сопротивления одной опоры P продольному перемещению трубопровода для участка между неподвижной опорой и вершиной угла поворота суммарное сопротивление продольному перемещению будет равно сопротивлению трех опор и плюс половина усилия опоры на вершине угла. Вторая половина участвует при деформации прилегающего участка.

Уравнение, связывающее комплекс конструктивных и эксплуатационных параметров исследуемого участка трубопровода с одним неизвестным параметром a , представлено в следующем виде:

$$\bar{N}_0 - \sqrt[3]{\alpha^2} - 3,5\bar{P} - Z\bar{v}_0 \left[1 + \frac{\sqrt[3]{\alpha}}{a} \left(\frac{\pi}{4} \right)^2 \bar{v}_0 \right] - K_1 \cdot \bar{v}_1^2 = 0, \quad (4)$$

где \bar{N}_0 , \bar{P} , Z , K_1 – безразмерные параметры усилий N_0 и P , конструкции опоры (Z) и влияния вертикального прогиба (K_1); \bar{v}_1 – безразмерный параметр вертикального прогиба участка трубопровода между неподвижными опорами.

Определение значения параметра a в выражении (4) позволит вычислить максимальный изгиб участка трубопровода v_{max} и максимальные продольные напряжения $\sigma_{пр}$ под воздействием продольного сжимающего усилия, вызванного положительным температурным перепадом и внутренним давлением. Суммарные продольные напряжения определяются в соответствии с требованиями свода правил СП 36.13330.2012.

Следует отметить, что под действием собственного веса и продольного сжимающего усилия происходит также вертикальный изгиб трубопровода между опорами v_1 . На подвижных опорах вертикальный прогиб трубопровода равен нулю

и равен нулю угол наклона продольной оси трубопровода. На неподвижных опорах также равен нулю прогиб и угол наклона трубопровода.

Вертикальный изгиб трубопровода между подвижными опорами равен

$$v_1 = \frac{ql_0^4}{16EI} \bar{v}_1, \quad (5)$$

где \bar{v}_1 – безразмерный параметр вертикального прогиба надземного участка трубопровода между подвижными опорами, определяемый в зависимости от параметра a_1 , характеризующего длину пролета между подвижными опорами l_0 .

В сечениях наибольшего вертикального прогиба для вычисления изгибающего момента получено

$$M_0 = ql_0^2 \bar{M}_0, \quad (6)$$

где \bar{M}_0 – безразмерный параметр изгибающего момента.

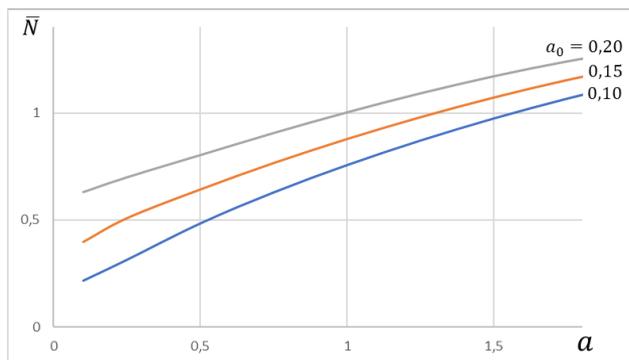
Для вычисления \bar{v}_1 и \bar{M}_0 также получены расчетные формулы.

Полученные расчетные формулы безразмерных параметров изгиба \bar{v}_0 , продольного усилия \bar{N} и изгибающего момента \bar{M} позволяют провести общий анализ изгиба и напряжений в стенке труб от воздействия температурного перепада и рабочего давления независимо от диаметра труб. На Рисунке 2 приведены зависимости \bar{N} , \bar{v}_0 , \bar{M} от параметра a при значениях $a_0 = 0,1; 0,15; 0,2$.

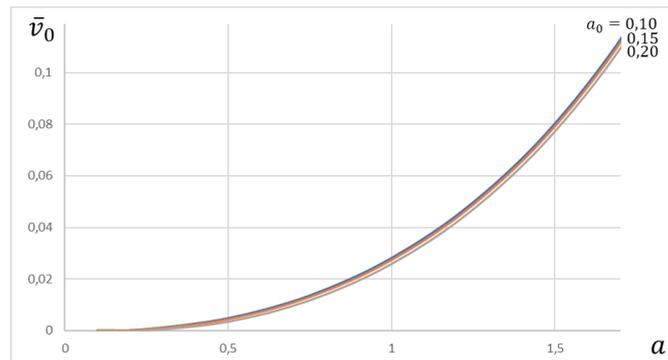
Приведенные графики позволяют качественно оценить влияние геометрических, конструктивных и эксплуатационных параметров зигзагообразного участка надземного трубопровода на его напряженно-деформированное состояние для трубопроводов любых диаметров.

Количественная оценка влияния геометрических параметров трубы (D_n, δ, I, F), конструктивных (R, l_0, φ) и эксплуатационных ($q_p, p, \Delta t$) параметров зигзагообразного участка трубопровода на максимальные продольные напряжения и изгиб, возникающих от температурного перепада и внутреннего давления, проведена с помощью разработанной и запатентованной программы для ЭВМ на языке программирования Mathcad 15 для расчета напряженно-деформированного состояния зигзагообразного участка надземного трубопровода с учетом коэффициента трения на опорах по разработанной методике, описанной выше.

а)



б)



в)

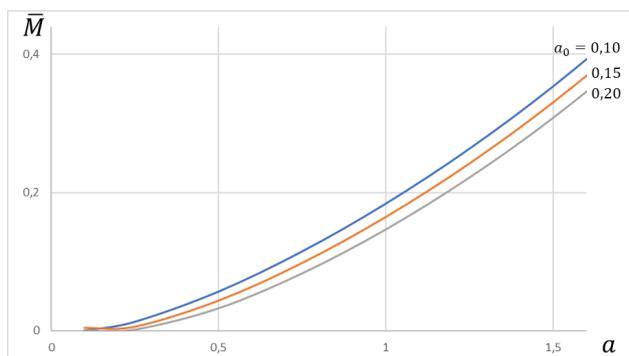


Рисунок 2 – Зависимость параметра продольного сжимающего усилия \bar{N} (а), параметра изгиба \bar{v}_0 (б), параметра изгибающего момента \bar{M} (в) на вершине угла поворота от a

Количественная оценка влияния конструктивных и эксплуатационных параметров на напряженно-деформированное состояние проводилась на примере надземного зигзагообразно уложенного участка магистрального трубопровода с параметрами, предельные значения которых принимались из опыта строительства и эксплуатации подобных надземных участков трубопроводов.

После многочисленных расчетов примеров с различными параметрами получены следующие результаты: при увеличении коэффициента трения на всех опорах от 0,1 до 0,8 максимальные продольные напряжения $\sigma_{пр}$ увеличиваются до 2 раз, при этом изгиб трубопровода v_{max} на вершине угла поворота уменьшается до 2 раз; при увеличении радиуса гнутого отвода на вершине угла поворота от $R = 5 \cdot D_H$ до $R = 40 \cdot D_H$ максимальные продольные напряжения $\sigma_{пр}$ уменьшаются до 1,5 раз, при этом изгиб трубопровода v_{max} на вершине угла поворота увеличивается незначительно, до 1,01 раза; при увеличении угла отклонения трубопровода от горизонтальной оси φ от 5 до 15 градусов максимальные продольные напряжения $\sigma_{пр}$ уменьшаются до 5 раз, при этом изгиб трубопровода

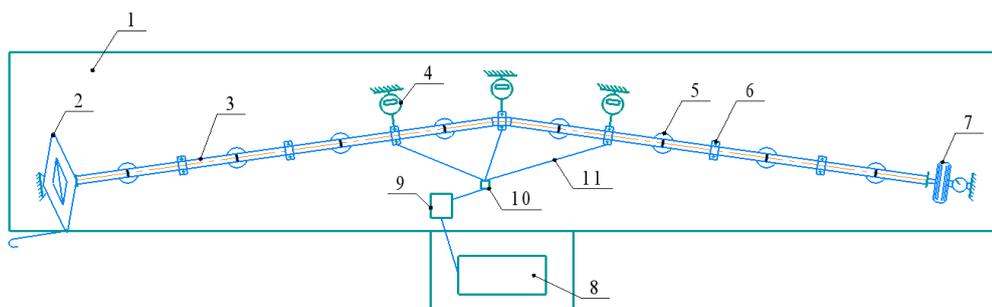
v_{max} на вершине угла поворота уменьшается до 2 раз; при увеличении длины пролета между опорами l_0 от 10 до 40 м максимальные продольные напряжения $\sigma_{пр}$ увеличиваются до 3 раз, при этом изгиб трубопровода v_{max} на вершине угла поворота увеличивается до 4 раз; влияние вертикального прогиба v_1 между опорами на величину максимальных продольных напряжений не превышает 0,5 %.

Также получены аналитические зависимости параметров напряженно-деформированного состояния для случаев, когда коэффициент трения на опоре на вершине угла поворота больше, чем на остальных опорах в 2, 3 и 4 раза.

Расчеты показали, что при увеличении коэффициента трения на вершине угла поворота максимальные продольные напряжения $\sigma_{пр}$ и изгиб трубопровода v_{max} на вершине угла поворота уменьшаются. Так при увеличении коэффициента трения в 4 раза напряжения $\sigma_{пр}$ уменьшаются до 5 %, при этом изгиб v_{max} также уменьшается до 5 %.

В практике эксплуатации величина угла отклонения трубопровода от горизонтальной оси φ составляет как правило 12-15 градусов. Изучив количественное влияние изменения коэффициента трения на вершине угла поворота и угла отклонения трубопровода от горизонтальной оси на НДС рассматриваемого участка трубопровода, получили следующее: при увеличении угла отклонения трубопровода от горизонтальной оси φ до 15 градусов можно добиться уменьшения максимальных продольных напряжений на вершине угла поворота до 6 раз и уменьшения изгиба до 3 раз с учетом того, что коэффициент трения на вершине в 4 раза больше, чем на остальных опорах, при этом используется гнутый отвод радиусом $R = 40 \cdot D_n$. Данный расчетный случай можно рассматривать как рациональный конструктивный вариант для уменьшения максимальных продольных напряжений и изгиба трубопровода на самом опасном для эксплуатации участке – на вершине угла поворота.

В третьей главе приведена проверка адекватности, работоспособности и практической пригодности разработанной методики расчета НДС зигзагообразного участка трубопровода экспериментальным методом и методом компьютерного математического моделирования. Схема экспериментальной установки при виде сверху изображена на Рисунке 3.



- 1 – станина; 2 – механический винтовой домкрат КД-01; 3 – зигзагообразный участок трубы; 4 – электронный индикатор перемещений ИЧЦ-10; 5 – тарированные грузы; 6 – хомуты, имитирующие опоры; 7 – механический динамометр сжатия ДОСМ-3-0,05; 8 – компьютер; 9 – плата Arduino Uno; 10 – аналогово-цифровой преобразователь НХ711; 11 – соединительные провода

Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки (вид сверху)

Две стальные трубы диаметром 21,3 мм толщиной стенки 2,8 мм из стали марки Ст3, длиной по 2 м каждая, соединенные между собой с помощью гнутого отвода радиусом 0,639 м ($R = 30D_H$) под углом равным $\varphi = 5^\circ$ к горизонтальной оси. Момент инерции поперечного сечения трубы равен $I = 7121 \text{ мм}^4$, осевой момент сопротивления равен $W = 668,7 \text{ мм}^3$, площадь поперечного сечения трубы равна $F = 162,7 \text{ мм}^2$. Вес одного метра трубы составляет $q_m = 12,8 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

Станина 1 жестко соединена с основанием и стеной без возможности ее перемещения. Сваренный зигзагообразно участок трубы 3 уложен на опоры 6 с расстоянием между опорами 0,5 м на станину 1. Опоры 6 устанавливались так, чтобы труба на промежуточных опорах между вершиной угла поворота и неподвижной опорой имела возможность свободно передвигаться, тогда как труба на опоре в вершине угла поворота могла двигаться только в поперечном направлении. В качестве поперечной нагрузки использовались тарированные грузы 5, которые подвешивались между пролетами. Испытания проводились при следующих поперечных нагрузках: $q = 22,8 \text{ Н/м}$, $q = 32,8 \text{ Н/м}$, $q = 52,8 \text{ Н/м}$, $q = 72,8 \text{ Н/м}$. Продольное сжимающее усилие создавалось с помощью механического ромбического винтового домкрата 2 с одной стороны трубы и измерялось динамометром сжатия 7 с другой стороны трубы.

Для измерения напряжений применялись тензодатчики, которые наклеивались на трубу в зоне растяжения. Для измерения поперечных перемещений трубопровода под воздействием продольного сжимающего усилия использовались индикаторы перемещения 4.

Для достижения точности и достоверности экспериментальных исследований влияния коэффициента трения f_T на перемещения трубопровода и возникающих при этом напряжений в стенке трубы коэффициент трения определялся на основе опытов с теми материалами, с которыми производился основной эксперимент по определению напряжений и перемещений рассматриваемого участка трубы. Необходимые коэффициенты трения между трубой и опорой создавались с помощью различных материалов: полиэтилена, наждачной бумаги и резины. По результатам проведенных опытов установлено, что коэффициент трения между трубой и полиэтиленом составил $f_T = 0,22$, между трубой и наждачной бумагой $f_T = 0,91$, между трубой и резиной $f_T = 0,64$.

С помощью разработанной программы для ЭВМ на основе полученной методики, определены расчетные значения продольного усилия N , напряжения изгиба $\sigma_{и}$ и максимального изгиба v_{max} для заданных характеристик экспериментальной установки с учетом того, что суммарные продольные напряжения в стенке трубы не должны превышать предела текучести материала трубы (Ст3) равной $\sigma_T = 240$ МПа. Длину трубы для экспериментальной установки выбрали исходя из того, что приложенные продольные сжимающие усилия в трубе будут соответствовать условию, что длина изогнутого участка $l \leq 4l_0 = 2$ м.

По результатам планирования эксперимента минимальное количество измерений для сжимающих усилий равно 15, для напряжений 16, для изгибов 13. Принято решение провести по 16 измерений всех величин.

По результатам лабораторного эксперимента получены параметры изгиба и напряжения изгиба на вершине угла поворота экспериментального участка трубы с учетом различных коэффициентов трения на опорах. На Рисунках 4 и 5 представлены зависимости напряжений изгиба $\sigma_{и}$ и изгиба участка трубы на вершине угла поворота v_{max} от продольного сжимающего усилия N в виде

кружков, треугольников, квадратов и ромбов в зависимости от приложенной поперечной распределенной нагрузки и коэффициента трения на опорах, а сплошными линиями показана теоретическая зависимость, полученная с помощью разработанной методики.

Как видно по полученным графикам 4-5, разработанные аналитические зависимости напряжений и изгиба с максимальной погрешностью в 8 % от экспериментально полученных значений достаточно точно описывают напряженно-деформированное состояние зигзагообразного участка трубопровода под действием продольного сжимающего усилия.

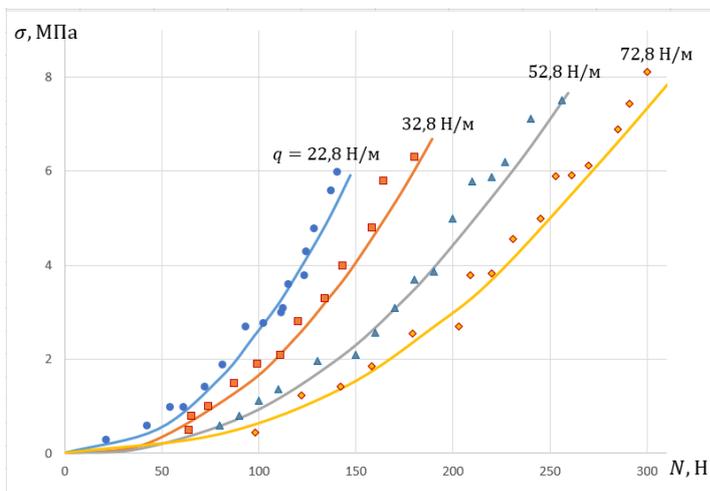


Рисунок 4 – Зависимость максимальных напряжений изгиба $\sigma_{и}$ от продольного сжимающего усилия N при значении коэффициента трения на опорах $f_T = 0,64$

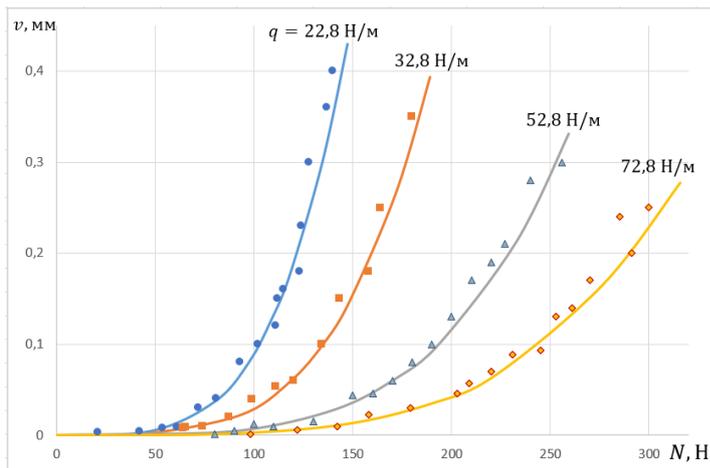


Рисунок 5 – Зависимость максимального изгиба участка трубы v_{max} от продольного сжимающего усилия N при значении коэффициента трения на опорах $f_T = 0,64$

Для установления взаимосвязи полученных экспериментальных величин с расчетными значениями проведен корреляционный анализ. При заданной надежности 0,999 для наименьшего по величине коэффициента корреляции изгиба

$r_v = 0,889$ расчет критерия Стьюдента говорит о значимости наименьшего из полученных коэффициентов корреляции. Следовательно, все остальные полученные коэффициенты корреляции также статистически значимы.

Можно утверждать, что экспериментальные исследования подтвердили характер перемещений и напряжений на вершине угла поворота участка трубы с учетом силы трения на опорах под действием продольного сжимающего усилия, следовательно, можно говорить об адекватности полученной математической модели реальным условиям. Погрешность полученных экспериментальных величин напряжений и изгиба можно объяснить существенным влиянием внешних факторов (температура), человеческого фактора, а также дискретным характером приложенных нагрузок и усилий.

В четвертой главе приведены разработанные способы повышения прочности надземных зигзагообразных участков трубопроводов с учетом предлагаемых в диссертации результатов исследований исходя их основных воздействий и факторов, влияющих на прочность надземных зигзагообразных участков трубопроводов, а также из опыта их проектирования, строительства и эксплуатации (Рисунок 6).

С учетом разработанной методики расчета напряженно-деформированного состояния надземных зигзагообразных участков трубопроводов, рассмотренных в главе 2, и основного нормативно-технического документа по расчету магистральных трубопроводов на прочность СП 36.13330.2012, предложен алгоритм усовершенствованной методики расчета данных участков трубопровода на прочность, заключающийся в следующем: максимальные продольные напряжения $\sigma_{пр}$, полученные по разработанной методике расчета, с учетом усилия трения на опорах, радиуса гнутого отвода и вертикальных перемещений между опорами, используют при проверке условия прочности для надземных участков трубопроводов по формуле (33) в СП 36.13330.2012. Если условие прочности не выполняется, тогда необходимо применить один из предложенных вариантов обеспечения прочности, приведенных на Рисунке 6.

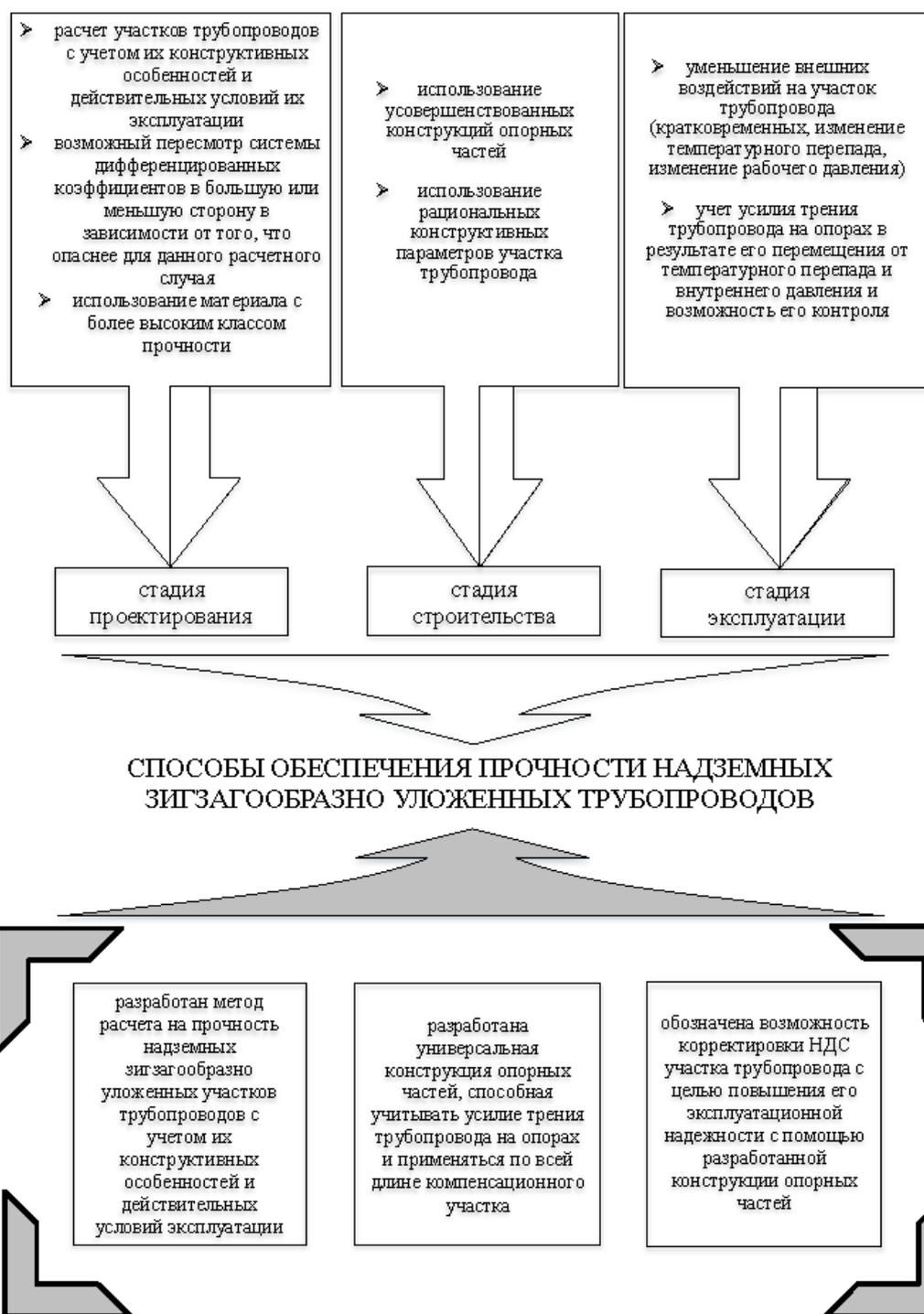
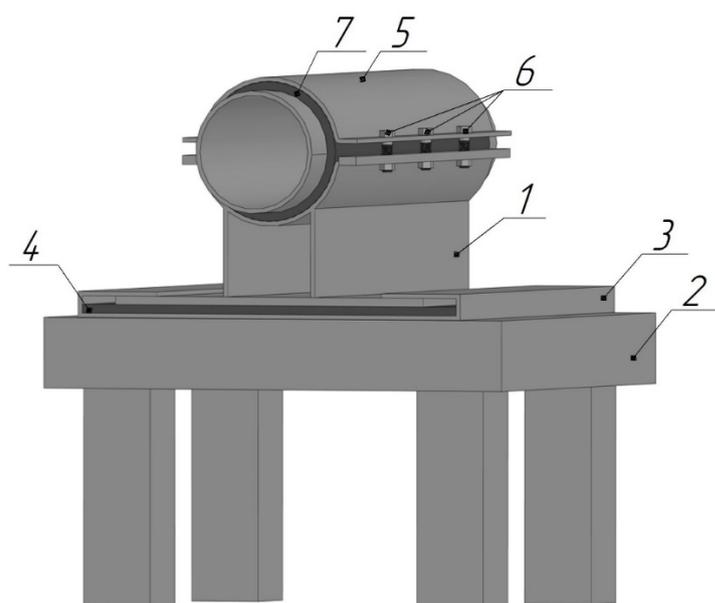


Рисунок 6 – Способы обеспечения прочности надземных зигзагообразно уложенных трубопроводов

Также в 4 главе предложена усовершенствованная конструкция опорных частей надземных трубопроводов, позволяющая корректировать НДС зигзагообразно уложенного участка трубопровода (Рисунок 7, Патент РФ № 208410).



- 1 – полый коробчатый корпус;
- 2 – строительная конструкция;
- 3 – связывающая плита;
- 4 – съемная прокладка;
- 5 – хомут;
- 6 – крепежные элементы;
- 7 – упругий элемент

Рисунок 7 – Конструктивная схема предлагаемой опоры для надземного трубопровода

Опора для надземного трубопровода содержит полый коробчатый корпус 1, основание которого вставлено в пазы жестко закрепленной со строительной конструкцией 2 связывающей плиты 3, на которой расположена съемная прокладка 4. Полый коробчатый корпус 1, в свою очередь, жестко соединен с хомутом 5, прижимающимся к трубопроводу крепежными элементами 6, и покрыт с внутренней стороны упругим элементом 7.

Съемную прокладку и упругий элемент необходимо выполнять из материала, имеющего необходимый для данного расчетного случая коэффициент трения между контактирующими поверхностями. Размеры паза связывающей плиты необходимо подбирать с учетом расчетных поперечных перемещений трубопровода в горизонтальной плоскости.

При воздействии температурного перепада трубопровод перемещается вдоль своей оси, скользя по упругому элементу 7 в хомуте 5. На вершине угла поворота зигзагообразно проложенного трубопровода перемещения происходят перпендикулярно оси, в этом случае основание полого коробчатого корпуса 1 скользит по съемной прокладке 4 в пазах связывающей плиты 3. С увеличением сил прижатия хомута 5 к трубопроводу через упругий элемент 7 регулируют перемещения эксплуатируемого трубопровода в продольном направлении в пределах соблюдения условия сохранности свойств упругого элемента. Выбрав

материал прокладки 4 с учетом значения его коэффициента трения о материал корпуса, регулируют перемещения эксплуатируемого трубопровода в поперечном направлении в пределах соблюдения условия сохранности свойств упругого элемента.

В качестве материала упругого элемента и съемной прокладки можно использовать резину различных марок с различными техническими характеристиками в зависимости от необходимого коэффициента трения f_T по материалу трубы, который может варьировать от 0,6 и более.

Предлагаемая конструкция опоры является универсальной в связи с тем, что может применяться на любом участке зигзагообразно проложенного трубопровода с учетом следующих рекомендаций: если обеспечить коэффициент трения между контактирующими поверхностями «корпус – связывающая плита» и «труба – хомут» равным 1, то опора может применяться как неподвижная; если обеспечить коэффициент трения между контактирующими поверхностями «корпус – связывающая плита» равным 1, то опора может применяться как продольно-подвижная; если обеспечить коэффициент трения между контактирующими поверхностями «корпус – связывающая плита» и «труба – хомут» равным менее 1, то опора может применяться как свободно-подвижная.

Осуществлять корректировку НДС надземного зигзагообразного участка трубопровода на опорах предлагаемой конструкции возможно с учетом полученных в 4 главе аналитических зависимостей. Условие обеспечения сохранности свойств упругого элемента по назначению, то есть необходимое условие для выбора материала упругого элемента в данной конструкции, при действии напряжений сжатия

$$\sigma_1, \sigma_2 \leq [\sigma], \quad (7)$$

в котором σ_1 – напряжения сжатия, действующие на упругий элемент от действия веса трубопровода; σ_2 – напряжения сжатия упругого элемента хомутом; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение на упругий элемент, выше которого упругий элемент теряет способность по назначению иметь высокий коэффициент трения по материалу трубопровода.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ существующих методик расчета НДС надземных зигзагообразно уложенных участков трубопроводов позволил установить основные направления исследования, отражающие действительные условия эксплуатации данных участков, и существенно влияющие на их напряженно-деформированное состояние параметры: усилие трение на опорах, радиус гнutoго отвода на вершине, вертикальный прогиб между опорами.

2. Полученные аналитические зависимости параметров напряженно-деформированного состояния эксплуатируемого надземного трубопровода от сил трения на опорах, радиуса гнutoго отвода на вершине угла поворота, вертикального прогиба между опорами и снижения продольного сжимающего усилия при перемещениях трубопровода, позволили установить следующее: с увеличением коэффициента трения в пределах возможных значений на всех опорах максимальные продольные напряжения увеличиваются до 2 раз при снижении изгиба до 2 раз, а с увеличением радиуса гнutoго отвода – уменьшаются до 1,5 раз при незначительном увеличении изгиба; при увеличении коэффициента трения на опоре в вершине угла поворота до 4 раз при угле отклонения трубопровода от горизонтальной оси 15 градусов и радиусе гнutoго отвода $R = 40D_n$ можно добиться максимального снижения продольных напряжений и перемещений. Влияние вертикального прогиба зигзагообразного участка трубопровода между опорами на величину максимальных продольных напряжений и изгиба на вершине угла поворота не превышает 0,5 %.

3. Разработанная конструкция опорных частей для надземных участков зигзагообразно уложенных трубопроводов позволяет корректировать усилие трения участка трубопровода на опорах во время эксплуатации с целью повышения эксплуатационной надежности данных участков трубопроводов с учетом полученных аналитических зависимостей.

4. Исследования критериев прочности надземных участков трубопроводов и условий их эксплуатации позволили разработать классификацию способов обеспечения прочности надземных зигзагообразно уложенных трубопроводов на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации данных участков трубопроводов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Акчермушев В.В. Совершенствование конструкции опоры для надземного зигзагообразно проложенного трубопровода / В.В. Акчермушев, К.В. Кожаева, И.Ф. Кантемиров, Х.А. Азметов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. № 2 (130). С. 70-83.

2. Акчермушев В.В. К вопросу обеспечения прочности надземных зигзагообразных участков магистральных трубопроводов / В.В. Акчермушев, К.В. Кожаева, Х.А. Азметов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. № 5 (133). С. 100-111.

3. Акчермушев В.В. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2021665164. Расчет напряженно-деформированного состояния зигзагообразно уложенного надземного трубопровода с учетом сил трения на опорах: заявл. 10.09.2021: опублик. 21.09.2021 /

Акчермушев В.В., Кожаева К.В., Азметов Х.А.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ).

4. Акчермушев В.В. Патент РФ № 208410 Российская Федерация, МПК F16L 3/00. Опора для надземного трубопровода / В.В. Акчермушев, К.В. Кожаева, Х.А. Азметов, И.Ф. Кантемиров. – №2021108522; заявлено 29.03.2021; опублик. 16.12.2021. Бюл. № 35.

5. Акчермушев В.В. Анализ прочностного расчета зигзагообразной прокладки надземного трубопровода / В.В. Акчермушев, Д.А. Жигулин, К.В. Кожаева // Трубопроводный транспорт — 2020: тезисы докладов XV Международной учебно-научно-практической конференции / редкол.: Р.Н. Бахтизин, С.М. Султанмагомедов и др. Уфа: Изд-во УГНТУ. 2020. С. 149–150.

6. Акчермушев В.В. Влияние конструктивных особенностей зигзагообразно проложенного трубопровода на его эксплуатационное состояние / В.В. Акчермушев, К.В. Кожаева, Х.А. Азметов // Актуальные проблемы науки и техники — 2021: сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых (Уфа, 15 марта — 19 марта 2021 г.): в 2 т./под общ. ред. канд. техн. наук Рабаева Р.У. — Уфа: Изд-во УГНТУ, 2021. Том 1. С.179-181.

7. Акчермушев В.В. Методика расчета на прочность зигзагообразно уложенного надземного трубопровода с учетом сил трения / В.В. Акчермушев, К.В. Кожаева, И.Ф. Кантемиров // Материалы 72-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. В 2 т. / отв. ред. Р.У. Рабаев. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2021. Том 1. С. 379.

8. Акчермушев В.В. Анализ напряженно-деформированного состояния зигзагообразных участков надземных трубопроводов / В.В. Акчермушев, Х.А. Азметов // Трубопроводный транспорт — 2021: тезисы докладов XVI Международной учебно-научно-практической конференции / редкол.: Р.Н. Бахтизин, С.М. Султанмагомедов и др. Уфа: Изд-во УГНТУ. 2021. С. 213-214.

9. Акчермушев В.В. Методика расчета напряженно-деформированного состояния надземного зигзагообразно уложенного участка трубопровода / В.В. Акчермушев, Д.А. Жигулин, К.В. Кожаева // Трубопроводный транспорт — 2021: тезисы докладов XVI Международной учебно-научно-практической конференции / редкол.: Р.Н. Бахтизин, С.М. Султанмагомедов и др. Уфа: Изд-во УГНТУ. 2021. С. 215-216.

10. Акчермушев В. В. Повышение эксплуатационной надежности зигзагообразно уложенных надземных трубопроводов / В.В. Акчермушев, И.Ф. Кантемиров, К.В. Кожаева // Нефтегазовый терминал. Выпуск 22: материалы международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы транспорта и хранения углеводородных ресурсов при освоении Арктики и Мирового океана» / под общ. ред. Ю. Д. Земенкова. – Тюмень: ТИУ, 2021. – С. 245-250.

11. Акчермушев В.В. Способ контроля и корректировки напряженно-деформированного состояния надземного трубопровода на опорах / В.В. Акчермушев, К.В. Кожаева // Актуальные проблемы науки и техники – 2022: материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, г. Уфа, 28 марта – 1 апреля 2022 г. В 2 т. / редкол.: Р.У. Рабаев [и др.]. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2022. Том 1. С.104-106.

12. Акчермушев В.В. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния надземных зигзагообразных участков трубопроводов / В.В. Акчермушев, К.В. Кожаева // Материалы 73-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. В 2 т. / отв. ред. Р.У. Рабаев. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2022. С.192-193.