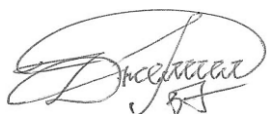


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

*На правах рукописи*

Джемилёв Энвер Русланович



**ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА РЕМОНТА МАГИСТРАЛЬНЫХ  
НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ С ВЫРЕЗКОЙ ИХ УПРУГО-ИЗОГНУТЫХ  
ДЕФЕКТНЫХ УЧАСТКОВ**

Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,  
баз и хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Шаммазов И.А.

Санкт-Петербург – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ В ОБЛАСТИ РЕМОНТА ДЕФЕКТНЫХ УЧАСТКОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ .....</b>	<b>12</b>
1.1 Существующие дефекты магистральных трубопроводов и способы их ремонта .....	12
1.2 Последовательность ремонтных работ по вырезке дефектных участков магистральных трубопроводов.....	17
1.3 Влияние упругого изгиба трубопровода на процесс вырезки дефектного участка .....	19
1.4 Анализ возможных способов устранения резкого смещения концов трубопровода при его разрезании.....	23
1.5 Анализ применимости существующих методов оценки пространственного положения магистральных трубопроводов при производстве ремонтных работ с вырезкой их дефектных участков .....	32
1.6 Цель и задачи исследований .....	44
1.7 Выводы по главе 1 .....	45
<b>ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РЕМОНТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСТРОЙСТВ ФИКСИРОВАНИЯ И ЦЕНТРИРОВАНИЯ ИХ КОНЦОВ .....</b>	<b>47</b>
2.1 Разработка схемы конструкции устройства фиксирования и центрирования концов трубопровода .....	47
2.2 Разработка способа ремонта магистральных трубопроводов с вырезкой их дефектных участков с применением устройств фиксирования и центрирования .....	50
2.3 Разработка математической модели расчета усилий для устранения смещения концов трубопровода и их центрирования.....	53
2.3.1 Динамический расчет усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода .....	53

2.3.2 Статический расчет сил реакций в захватах устройств фиксирования и центрирования в конце процесса колебаний концов трубопровода.....	70
2.3.3 Расчет усилий для центрирования концов трубопровода друг с другом перед приваркой нового участка .....	73
2.4 Выводы по главе 2.....	76
<b>ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЛИЧИН УСИЛИЙ ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ КОНЦОВ ТРУБОПРОВОДА ОТ СМЕЩЕНИЯ И ИХ ЦЕНТРИРОВАНИЯ.....</b>	<b>77</b>
3.1 Методика проведения экспериментальных исследований величин усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования .....	77
3.2 Результаты экспериментальных исследований величин усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования	89
3.3 Выводы по главе 3.....	94
<b>ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ВЕЛИЧИН УСИЛИЙ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ КОНЦОВ ТРУБОПРОВОДА И ИХ ЦЕНТРИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ОБЛАКА ТОЧЕК ЕГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ .....</b>	<b>95</b>
4.1 Методика проведения экспериментальных исследований величин усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования по данным его лазерного сканирования .....	95
4.2 Результаты экспериментальных исследований величин усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования по данным его лазерного сканирования .....	111
4.3 Выводы по главе 4.....	119
<b>ГЛАВА 5 АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО СПОСОБА РЕМОНТА</b>	<b>121</b>
5.1 Методика расчета показателей экономической эффективности применения предлагаемых технологических решений.....	121
5.2 Расчет показателей экономической эффективности применения	

предлагаемых технологических решений .....	124
5.3 Выводы по главе 5.....	127
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>129</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>131</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение «Устройство фиксирования и центрирования концов трубопровода при вырезке его дефектного участка».....</b>	<b>156</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на полезную модель «Устройство фиксирования и центрирования концов трубопровода при его ремонте с вырезкой дефектного участка» .....</b>	<b>157</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Патент на изобретение «Способ ремонта дефектных участков магистральных трубопроводов» .....</b>	<b>158</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчета эксплуатационных нагрузок на устройства фиксирования и центрирования концов трубопровода при его ремонте с вырезкой дефектного участка» .....</b>	<b>159</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт внедрения результатов диссертации в деятельности ООО «Промышленная геодезия» .....</b>	<b>160</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

В процессе эксплуатации нефте- и газопроводов в них возникает множество дефектов. Наиболее применяемым методом устранения дефектов является их вырезка. Процесс вырезки дефектного участка трубопровода осложняется ввиду имеющихся его упругих деформаций, как правило, возникающих на участках поворота его трассы, а также вследствие подвижек грунтов в процессе эксплуатации. В связи с этим при окончании первого разрезания трубопровод стремится принять естественное для него положение, в результате чего происходит резкое смещение его концов, находящихся по обе стороны от места разрезания, друг относительно друга. Это опасно для здоровья и жизни персонала и может привести к поломке режущего оборудования.

При этом для возврата концов трубопровода в исходное положение требуется использование трубоукладчиков, перевозка которых до места производства работ и обратно требует дополнительной оплаты, что также повышает затраты на производство ремонтных работ.

В связи с вышесказанным разработка новых научно-технических решений, которые бы позволили устранить резкое смещение концов трубопровода при его разрезании и снизить затраты на производство ремонтных работ, является актуальной задачей.

### **Степень разработанности темы исследования**

Разработкой научных основ и методов обеспечения эффективности и безопасности процессов проектирования, строительства, эксплуатации и ремонта магистральных нефтегазопроводов занимались И.А. Шаммазов, П.П. Бородавкин, А.С. Кузьбожев, Р.Н. Бахтизин, Д.И. Сидоркин, В.Л. Березин, Э.М. Ясин, А.Г. Гумеров, О.М. Иванцов, Л.И. Быков, Р.С. Гумеров, Р.С. Зайнуллин, К.М. Гумеров, Т. Parker, Р. Hopkins, X. Zhang, P.C. Law и др.

Тем не менее к настоящему времени не сформированы комплексные подходы к вопросу проведения ремонтных работ с вырезкой дефектных участков трубопровода при наличии его упругого изгиба, а также этапы работ, вызывающие наибольшую сложность, в достаточной степени не регламентированы по времени и последовательности операций. В связи с этим наблюдается большое множество нарушений техники безопасности в процессе ремонта, что в итоге существенно снижает его эффективность.

Содержание диссертации **соответствует следующим областям исследования паспорта научной специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ:**

П1. Технологические процессы и технические средства для проектирования, сооружения, эксплуатации, теоретические и практические основы взаимодействия объектов трубопроводного транспорта с окружающей средой с целью создания высокоэффективных, энерго- и ресурсосберегающих, надежных, механически и экологически безопасных сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта.

П4. Методы и средства информационных технологий, моделирования, мониторинга, прогнозирования, интеллектуального инжиниринга и управления, автоматизации и роботизации, стандартизации и цифровизации технологических процессов проектирования, сооружения, эксплуатации, диагностики, ремонта сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта с целью

повышения эффективности, надежности и безопасности использования отраслевого потенциала и ресурса трубопроводных конструкций.

**Объект исследования** – магистральные нефте- и газопроводы.

**Предмет исследования** – напряженно-деформированное состояние магистральных нефте- и газопроводов при производстве ремонтных работ с вырезкой их дефектных участков.

**Цель работы** – обоснование способа ремонта магистральных трубопроводов, обеспечивающего безопасный процесс вырезки дефектных участков.

**Идея работы** – безопасный процесс вырезки дефектного участка магистрального трубопровода обеспечивается путем приложения усилий, удерживающих его концы от резкого смещения при разрезании трубопровода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ источников литературы и патентных материалов по теме исследования;
2. Разработать схему конструкции устройства для фиксирования положения трубопровода перед его разрезанием, а также центрирования его концов перед приваркой нового участка;
3. Разработать математическую модель для оценки усилий, создаваемых захватами разработанных устройств для устранения резкого смещения концов трубопровода при его разрезании и их центрирования перед приваркой нового участка на основе коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение его центральной оси;
4. Разработать метод оценки значений коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси откопанного участка трубопровода на основе координат облака точек его лазерного сканирования;

5. Разработать рекомендации по осуществлению и оценить параметры технико-экономической эффективности предлагаемого способа ремонта магистральных трубопроводов.

**Научная новизна работы:**

1. Получены аналитически и экспериментально подтверждены зависимости величин усилий, необходимых для устранения резкого смещения концов трубопровода при его разрезании и их дальнейшего центрирования перед приваркой нового участка, от коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси ремонтируемого участка трубопровода.

2. Разработан метод оценки значений коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси ремонтируемого участка трубопровода по данным его лазерного сканирования с учетом наличия неровностей изоляционного покрытия и величины угла сканируемого сектора трубопровода.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Получены зависимости величин усилий, необходимых для устранения резкого смещения концов трубопровода при его разрезании и их дальнейшего центрирования перед приваркой нового участка от коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси ремонтируемого участка трубопровода

2. Разработан метод оценки значений коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси ремонтируемого участка трубопровода по данным его лазерного сканирования с учетом неровностей его изоляционного покрытия и угла сканируемого сектора;

3. Разработанные в рамках кандидатской диссертации технологии были внедрены на базе компании ООО «Промышленная геодезия» (акт о внедрении результатов диссертации от 27.02.2024, Приложение Д).



**Методология и методы исследования.** Основой проведенных исследований является системный подход. При решении поставленных задач были использованы теоретические и экспериментальные методы исследования. К теоретическим методам относятся анализ и обобщение имеющегося опыта решения проблемы резкого смещения концов трубопровода при его ремонте, а также обоснование формул для расчета величин деформаций и напряжений в стенке трубопровода в процессе ремонтных работ. Экспериментальные исследования включали оценку значений коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода и усилий, необходимых для фиксирования его концов перед разрезанием.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Устранение резкого смещения концов ремонтируемого нефтегазопровода при его разрезании и центрирование их перед приваркой новой секции трубы осуществляется путем приложения к трубопроводу усилий, рассчитанных на основе математической модели, учитывающей значения коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода.

2. Определение коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода путем использования координат облака точек его лазерного сканирования при угле сканируемого сектора трубопровода не менее  $120^\circ$  и наличии неровностей его изоляционного покрытия, позволяет оценить величину усилий, необходимых для центрирования его концов и устранения их резкого смещения, с относительной погрешностью до 5%.

**Степень достоверности результатов исследования** подтверждается относительным отклонением в пределах 5% экспериментальных и теоретических исследований, проведенных с использованием современных лабораторий Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на производственных объектах.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies («FarEastCon»), (октябрь 2021, Владивосток); Всероссийская конференция «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых запасов тяжелых нефтей» (декабрь 2021, Ухта); Международная конференция, посвященная 85-летию Геннадия Васильевича Рассохина «Рассохинские чтения» (февраль 2021, Ухта); I Всероссийская научная конференция Транспорт и хранение углеводородов – 2022 (апрель 2022, Санкт-Петербург); XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (май 2022, Санкт-Петербург); XVII Международная научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2022» (ноябрь 2022, Уфа); II Всероссийская научная конференция «Трубопроводный транспорт – 2023» (апрель 2023, Санкт-Петербург); XIX Международный форум-конкурс молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (май 2023, Санкт-Петербург); II Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородных ресурсов» (июнь 2023, Санкт-Петербург).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, разработке методики исследования, проведении экспериментальных исследований величин усилий, необходимых для удержания концов трубопровода от их резкого смещения, определении пространственного положения центральной оси трубопровода по результатам его лазерного сканирования, разработке и обосновании эффективных технологических решений в области ремонта магистральных трубопроводов, написании научных статей по теме исследования.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах (пункты списка литературы № 29, 30, 115, 116, 132, 142, 143), в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получены 3 патента и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (приложения А, Б, В, Г).

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 154 наименования. Диссертация изложена на 161 странице машинописного текста, содержит 50 рисунков, 17 таблиц и 5 приложений.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю д.т.н., доценту Шаммазову Ильдару Айратовичу, д.т.н., профессору Николаеву Александру Константиновичу, д.т.н. профессору Щипачёву Андрею Михайловичу, к.т.н. Сидоркину Дмитрию Ивановичу за неоценимую помощь в работе, наставления и поддержку, а также коллективам кафедры транспорта и хранения нефти и газа Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, научных центров «Арктика» и «Геомеханики и проблем горного производства» за содействие при проведении диссертационного исследования.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ В ОБЛАСТИ РЕМОНТА ДЕФЕКТНЫХ УЧАСТКОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

## 1.1 Существующие дефекты магистральных трубопроводов и способы их ремонта

Дефекты магистральных трубопроводов в соответствии с [83, 85] делятся на следующие группы:

1. Дефекты, вызванные изменением геометрии стенки трубопровода:

– вмятина – произошедшее в результате механического воздействия локальное уменьшение проходного сечения трубы без излома оси трубопровода;

– гофр – выпуклости и вогнутости металла стенки трубопровода в поперечном направлении, по причине которых образуется излом его оси и уменьшение проходного сечения;

– овальность – отклонение сечения трубы от цилиндрической формы с взаимно перпендикулярным расположением линий максимального и минимального диаметров [83, 85].

2. дефекты стенки трубы:

– потеря металла – местное уменьшение номинальной толщины стенки трубы, являющееся результатом действия коррозионных процессов или технологии изготовления;

– риска (царапина, задир) – потеря металла при взаимодействии стенки трубы с твердым телом;

– расслоение – потеря сплошности металла стенки трубы, происходящее с выходом ее на поверхность [83, 85].

3. дефекты сварного шва – дефекты, локализующиеся в сварном шве стенки трубопровода [83, 85];

4. комбинированные дефекты – комбинации перечисленных выше дефектов [83, 85];

5. недопустимые конструктивные элементы – это детали или элементы, применение которых в конструкции магистральных трубопроводов не соответствует требованиям нормативно-технической документации. К числу таких элементов относятся тройники, плоские заглушки и днища, переходники, сварные секторные отводы, вварные и накладные заплаты всех видов и размеров [83, 85].

Выбор метода ремонта перечисленных дефектов осуществляется, исходя из [83, 85]. Методы ремонта делятся на методы постоянного и временного ремонта.

Методы постоянного ремонта используют при необходимости восстановления дефектного участка магистрального трубопровода до состояния бездефектного на период его эксплуатации. К таким методам можно отнести следующие:

- шлифовка;
- вырезка дефекта (замена катушки или замена участка);
- заварка;
- установка ремонтной конструкции (муфты, патрубки).

При производстве временного ремонта использование конструкций осуществляется только на время. К ним относятся, например, необходимая приварная муфта и муфта с коническими переходами, которые применяются в случае аварийного ремонта при условии с обязательной их заменой в срок до одного месяца на постоянные методы ремонта и при ремонте дефектов типа гофр в течение одного года. Муфты устанавливаются на период времени, длительность которого зависит от отношения максимального рабочего давления в зоне дефекта к проектному давлению [83, 85].

Применяемые методы ремонта магистральных трубопроводов представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Применяемые методы ремонта магистральных трубопроводов для разных типов дефектов [83, 85]

Группа дефектов	Тип дефекта	Методы ремонта
Поверхностные	Трещина, коррозия, задир, забоина, царапина, эрозионный износ стенки трубы	Шлифовка, ремонт заваркой дефекта, ремонт муфтой, ремонт заменой трубы (катушки)
Внутренние	Расслоение	Ремонт заменой трубы (катушки)
Геометрии	Вмятина, гофр, овальность сечения трубы	Ремонт муфтой, ремонт заменой трубы (катушки)
Сварки	Дефекты сварного соединения	Ремонт заменой трубы (катушки), шлифовка, ремонт муфтой

Рассмотрим каждый из методов ремонта дефектных участков.

#### *Шлифовка.*

Данный вид ремонта используется в случае образования дефектов типа потери металла, его расслоения с выходом на поверхность, мелких трещин, дефектов в зоне сварных швов с глубиной менее 20% от толщины стенки трубы. Ремонт в данном случае осуществляется восстановлением формы поверхности металла и снижении концентрации напряжений путем снятия металла [85].

Для реализации ремонта дефектного участка методом шлифовки максимальное давление в трубопроводе не должно превышать 2,5 МПа. Также остаточная толщина стенки трубопровода не должна быть меньше 80% от номинального ее значения [85].

#### *Заварка дефектов.*

Заварка дефектов магистральных трубопроводов используется при ремонте таких дефектов, как «потеря металла» и дефекты сварного шва. При этом остаточная толщина стенки должна быть не менее 5 мм, а максимально допустимое давление в трубопроводе не должно быть выше 2,5 МПа [85].

#### *Применение ремонтных конструкций.*

На нефтепроводах возможно применение большого многообразия сварных ремонтных муфт различных типов. Из перечисленных конструкций наиболее часто используемыми в процессе ремонта, являются:

Галтельная муфта – муфта, которая используется при наличии дефектов в поперечных сварных швах, устанавливаемая путем приварки к трубе. Также для заполнения пространства между трубой и галтелью антикоррозионной жидкостью муфта имеет специальную полость шириной 100 мм [84, 110].

Композитная муфта – стальная оболочка, не приваренная к телу трубопровода, установленная по специальной композитно-муфтовой технологии с заполненным композитом пространством между оболочкой муфты и стенкой трубопровода [59, 66, 71, 74, 121, 139].

Муфта с коническими переходами – необходимая приварная муфта с диаметром больше диаметра трубопровода и коническими переходами от цилиндрической части муфты к поверхности трубы [151]. Такой тип муфт допускается устанавливать в случаях, когда имеются препятствия для плотного прилегания муфты к поверхности ремонтируемой трубы (выступы, гофры, старые заплатки, искривления трубы, недопустимые формы сварных швов) [79, 125].

Обжимная приварная муфта – муфты с конструктивными элементами из металла трубы или листового проката. Такой тип муфт используется при ремонте дефектов геометрии трубы, повреждений на стенке трубы, зоне сварного шва и комбинированных дефектов [74, 125].

Разрезные тройники – конструкции, используемые для ремонта дефектов патрубков и устранения несанкционированных врезок, например, патрубки П7 [74].

Патрубки с усиливающими накладками – разрезные тройники, используемые в случае, если применение перечисленных выше конструкции не целесообразно. Минусом конструкции является ее негерметичность, ввиду чего она не позволяет предотвратить утечку

продукта из трубопровода. Также в результате приварки тройников к стенке трубы в месте сварки образуется высокая концентрация напряжений, что представляет потенциальную опасность разрушения тройников [74].

Чопы – конструкции, применяемые при необходимости герметизации отверстий в стенке остановленного трубопровода. предназначенные для герметизации отверстий на остановленных трубопроводах [74].

*Вырезка дефекта (замена катушки).*

При использовании данного метода ремонта дефектный участок трубы («катушка») вырезается, после чего на его место приваривается новый бездефектный участок.

Катушкой называется часть трубы, смонтированная вместо дефектной части трубы с помощью приварки к торцам трубопровода, появившимся после вырезки дефектной части трубы посредством двух кольцевых резов. При этом длина катушки должна быть не менее диаметра и не более длины заводской секции трубы [115, 138].

Замена дефектного участка магистрального трубопровода осуществляется при наличии:

- трещины длиной 50 мм и более в сварном шве или основном металле трубы;
- разрыва кольцевого (монтажного) шва;
- разрыва продольного (заводского) шва и металла трубы;
- вмятины глубиной, превышающей 3,5% диаметра трубы;
- царапины глубиной более 30% толщины стенки и длиной 50 мм и более [83, 85].

Таким образом, на основе приведенных данных о методах ремонта, используемых для устранения дефектов магистральных трубопроводов, можно сделать вывод, что наиболее универсальным методом ремонта является вырезка дефектных участков магистральных трубопроводов, что делает этот метод ремонта и одним из наиболее часто применяемых [143, 29].



Далее подробнее рассмотрим процесс производства ремонтных работ с вырезкой дефектного участка.

## **1.2 Последовательность ремонтных работ по вырезке дефектных участков магистральных трубопроводов**

При осуществлении ремонта с вырезкой дефектного участка производят следующие работы:

- вскрытие дефектного участка магистрального трубопровода;
- откачка транспортируемого продукта из ремонтируемого участка трубопровода;
- вырезка дефектного участка трубопровода;
- перекрытие полости трубопровода;
- разметка новой катушки;
- центрирование концов трубопровода;
- вварка новой катушки, контроль качества сварных швов и нанесение антикоррозионного покрытия;
- засыпка трубопровода минеральным грунтом, нанесение плодородного слоя почвы, рекультивация земли.

Одними из наиболее ответственных задач при вырезке дефектных участков магистральных трубопроводов являются вырезка дефектной катушки трубопровода и центрирование концов трубопровода друг с другом для приварки между ними нового бездефектного участка [1, 29, 87, 115, 138].

Рассмотрим каждый из этих двух этапов более подробно.

### **1. Вырезка дефектного участка трубопровода.**

Вырезку дефектного участка производят одним из следующих методов:

- холодная резка, осуществляемая с помощью машин для резки труб (МРТ);
- газовая резка пламенем от сгорания пропанокислородной смеси;
- резка с применением энергии взрыва [85].

При этом длина вырезаемого участка трубопровода должна быть больше длины имеющегося дефекта более чем на 100 мм с каждой стороны и более диаметра трубопровода.

Процесс производства ремонтных работ с вырезкой дефектного участка магистрального трубопровода осложняется резким смещением концов трубопровода после вырезки друг относительно друга.

2. Центрирование концов трубопровода перед приваркой нового участка.

Центрированием концов трубопровода является технологическая операция, при которой обеспечивается соосность его концов после вырезки дефектного участка.

Данный этап работ производится с помощью трубоукладчиков. При этом суммарное усилие при центрировании может достигать сотен тысяч килоньютон, в связи с чем в процессе ремонта используются два и более трубоукладчиков. В результате чего процесс производства ремонтных работ требует большого количества затрат времени, труда и финансов, а качество выполнения работ часто не соответствует нормативным условиям.

Определение соосности и излома оси ремонтируемых концов трубопровода производится в соответствии с рисунком 1.1 [86].

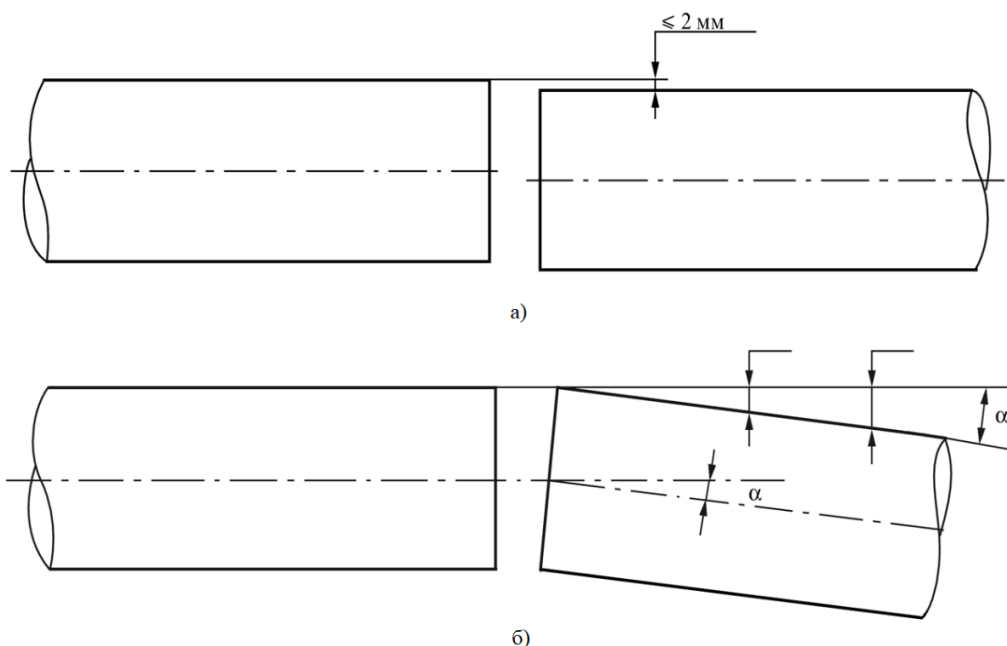


Рисунок 1.1 – Схема измерения соосности труб (а) и излома (б) [86]

Если величина несоосности концов трубопровода меньше 2 мм и нет излома оси трубопровода, то производят дальнейшие работы по установке новой катушки трубопровода [85].

При условии, если торцы свариваемых труб смещены по горизонтальной или вертикальной осям более чем на 2 мм с изломом оси трубопровода, то требуется дополнительное откапывание участка трубопровода [85].

В процессе установки нового участка трубы концы трубопровода не должны перемещаться, что обеспечивается неподвижностью положения стрелы трубоукладчика [85].

Если центрирование концов трубопровода с требуемыми параметрами их соосности не обеспечивается, то ремонт производится приваркой отводов холодного гнущего [85].

Монтаж катушки и ее сборка с трубопроводом осуществляется с помощью двух наружных центраторов, фиксирующих положение катушки и величину ее зазора с концами трубопровода [85].

При выполнении центрирования при устранении технологического разрыва на участке трубопровода применяются следующие схемы:

- схема 1 – концы магистрального трубопровода имеют свободу их перемещения по горизонтальной и вертикальной осям и не засыпаны грунтом;
- схема 2 – конец одного из стыкуемых участков трубопровода свободно перемещается по вертикальной и горизонтальной осям, а другой заземлен (примыкает к узлу запорной арматуры и т.п.);
- схема 3 – расположение обоих концов трубопровода соответствует условиям их соосности, но заземлены [85].

### **1.3 Влияние упругого изгиба трубопровода на процесс вырезки дефектного участка**

В процессе замены дефектного участка трубопровода при осуществлении его первого разрезания очень часто происходит резкое

смещение концов трубопровода, находящихся по краям от места разрезания, относительно друг друга. Это может привести к вырыванию металла трубы в конце процесса резания, а также травмам и летальным последствиям для рабочего персонала. Существующий порядок выполнения работ по замене дефектного участка трубопровода, описанный в разделе 1.2, не предусматривает предварительного фиксирования положения концов трубопровода перед его разрезанием. Как следствие, в процессе выполнения ремонтных работ трубопровод прижимают ковшем экскаватора, что не соответствует регламенту проведения ремонтных работ, снижает безопасность процесса ремонта и может привести к образованию дефектов трубопровода типа вмятин [29, 30].

Смещение концов трубопровода после его разрезания при прижатии трубопровода ковшем экскаватора представлено на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Смещение концов трубопровода после его разрезания при прижатии трубопровода ковшем экскаватора [142]

Основной причиной образования резкого смещения концов трубопровода является наличие упругого изгиба магистрального трубопровода. В результате после первого разрезания участка трубопровода, находящиеся по краям от места разрезания, стремятся принять естественное для них пространственное положение [115].

Сам же упругий изгиб трубопровода является следствием нагрузок, действующих на трубопровод как в процессе его сооружения, так и при эксплуатации [15, 16, 144].

В процессе эксплуатации подземного трубопровода на него действуют следующие виды нагрузок:

- нормативные нагрузки, которые действуют все время эксплуатации трубопровода и принимаются во внимание при проектировании трубопровода [11, 39, 81];
- ненормативные нагрузки, возникающие при воздействии на трубопровод окружающей среды и нарушениях правил строительства и эксплуатации трубопровода [17, 123].
- перепад температур, возникающий при эксплуатации трубопровода [8, 49, 76];
- собственный вес трубопровода, грунта насыпи и транспортируемого продукта [80, 81];
- неравномерное по длине трубопровода сопротивление со стороны грунта перемещениям трубопровода [144, 150];
- разность температур воздуха при прокладке трубопровода и его дальнейшей эксплуатации [35, 55];

К ненормативным нагрузкам относят неконтролируемые подвижки грунтов и механическое воздействие землеройной техники на трубопровод и окружающий его грунт [42, 108, 151].

Образование упругого изгиба трубопровода также является следствием того, что в обычных условиях эксплуатации трубопровода происходит осадка грунта под ним, заполняются пустоты, имеющиеся после его укладки и закапывания. При этом стоит отметить, что после укладки трубопровод вступает в работу практически с нулевым защемлением с грунтом, что так же способствует деформациям трубопровода под действием различного рода нагрузок [136].

К образованию упругого изгиба также приводит ряд природных факторов, к числу которых относятся повышенная влажность, нестабильность грунтов, в которых проложен трубопровод, крайне низкие и высокие температуры грунта, а также пересечения трубопроводами геодинамических зон [11, 116, 140]. Последний из перечисленных фактор представляет особую опасность, так как способствует образованию

критических для металла стенки трубопровода величин напряжений, что приводит к крупнейшим авариям в трубопроводном транспорте [6, 58, 69, 134, 141, 142, 147].

Также осадка грунта наблюдается в процессе оттока лишней влаги и при уплотнении грунта под действием собственного веса трубопровода и возникающих в процессе эксплуатации вибраций трубопровода [44, 104, 112].

В работе [126] доказано, что в процессе эксплуатации магистрального трубопровода распределенная нагрузка по длине трубопровода со стороны грунта не постоянна ввиду изменения физико-механических свойств грунта, причем повышенные значения нагрузки наблюдаются на участках с плотным грунтом.

Что касается трубопроводов, проложенных в многолетнемерзлых грунтах, то при их эксплуатации могут наблюдаться термокарсты, термоэрозия, солифлюкция, а также криогенное пучение грунтов. В результате чего происходят перемещения трубопровода, сопровождающиеся его упругими изгибами и дальнейшим нарушением устойчивости [13, 54].

В работе [146] определено, что при подземной прокладке трубопровода в зоне многолетнемерзлых грунтов наиболее опасными с точки зрения величины изгиба трубопровода являются участки перехода от грунтов высокой несущей способностью к талым грунтам с более низкими физико-механическими характеристиками.

Также установлено, что изменение напряженно-деформированного состояния на одних участках трубопровода приводит к его изменению на прилегающих участках, что способствует образованию упругих изгибов по всей длине магистрального трубопровода.

#### 1.4 Анализ возможных способов устранения резкого смещения концов трубопровода при его разрезании

Вырезка катушки осуществляется с помощью одновременно двух машин резки труб (МРТ). Машины для резки трубы устанавливаются на ней согласно [86] в соответствии с рисунком 1.3 [115].

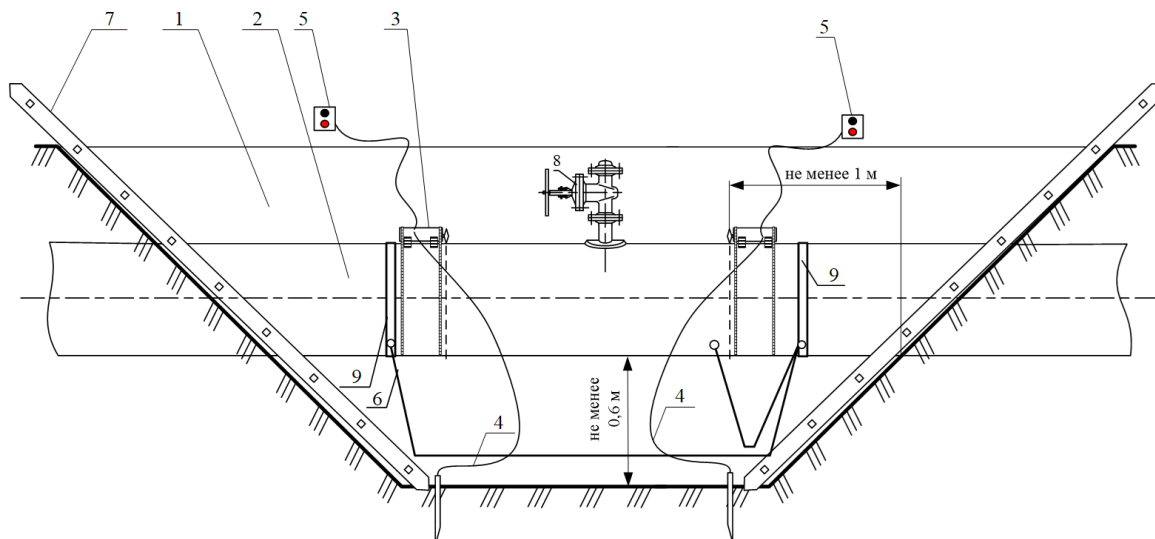


Рисунок 1.3 – Схема безогневой вырезки катушки [115]

- 1 – рабочий котлован; 2 – магистральный трубопровод; 3 – МРТ;  
 4 – провод заземления МРТ со штырем; 5 – пульт управления МРТ;  
 6 – шунтирующая перемычка; 7 – приставная лестница; 8 – вантуз;  
 9 – гибкая стальная лента (хомут)

Также стоит отметить, что существующий способ вырезки дефектных участков магистральных трубопроводов, описанный в [86], не предполагает фиксирования положения трубопровода в пространстве перед его резкой [116].

Далее необходимо провести анализ преимуществ и недостатков предлагаемых в настоящее время специалистами техник и технологий ремонта магистральных трубопроводов с вырезкой дефектного участка.

Способ ремонта магистрального трубопровода [47], заключается в откапывании дефектного участка и его вырезке таким образом, чтобы одна сторона трубопровода после вырезки была длиннее другой. При этом короткая труба является неподвижной и центрирование концов трубопровода осуществляют путем перемещения длинной трубы.

Графическое изображение данного способа представлено на рисунке

1.4.

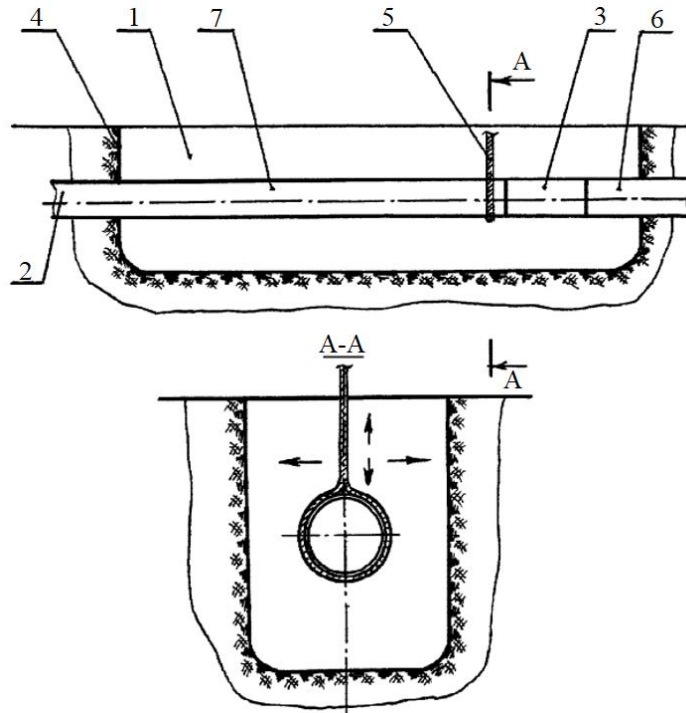


Рисунок 1.4 – Центрирование трубопровода созданием разноплечих труб [47]

1 – котлован; 2 – трубопровод; 3 – дефектный участок; 4 – поперечные стенки котлована; 5 – трос трубоукладчика; 6 – короткоплечая труба; 7 – длинноплечая труба

Недостатком данного способа является увеличение объема земляных работ для создания разноплечих участков трубопровода, малая точность центрирования осей концов трубопровода, а также возможная необходимость применения более одного трубоукладчика [115].

Монтаж устройства [46] осуществляется на опоры по краям ремонтного котлована с обеспечением вертикального перемещения и содержит в своей конструкции упоры со скосами, расширяющимися книзу, и снабженных U-образными вантами на поперечных полках упоров.

Описываемое устройство представлено на рисунке 1.5.



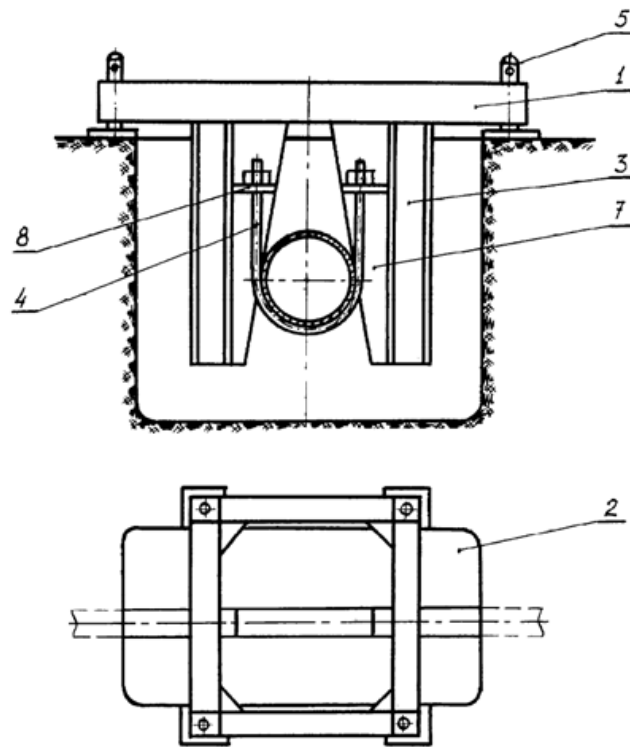


Рисунок 1.5 – Устройство для фиксации магистрального трубопровода [46]

- 1 – основание; 2 – ремонтный котлован; 3 – вертикальные стойки;  
 4 – U-образные ванты; 5 – резьбовые опоры; 6 – ось трубопровода;  
 7 – упоры; 8 – полки

Устройство обладает простой конструкцией, но не позволяет центрировать концы трубопровода по горизонтальной оси, а также зафиксировать положение самого устройства в пространстве, в результате чего не обеспечивается устранение смещения концов трубопровода при его разрезании [115].

В патенте [111] описывается устройство, снабженное стрингерами и подвижными упорами. По краям вырезаемого участка трубопровода устанавливаются хомуты. В отверстия приливов одного из хомутов продевают стрингеры. На стрингеры устанавливаются подвижные упоры, после чего стрингеры продевают в отверстия второго хомута. Далее вырезается дефектный участок, после чего приваривается новая катушка трубопровода.

Конструкция устройства представлена на рисунке 1.6.

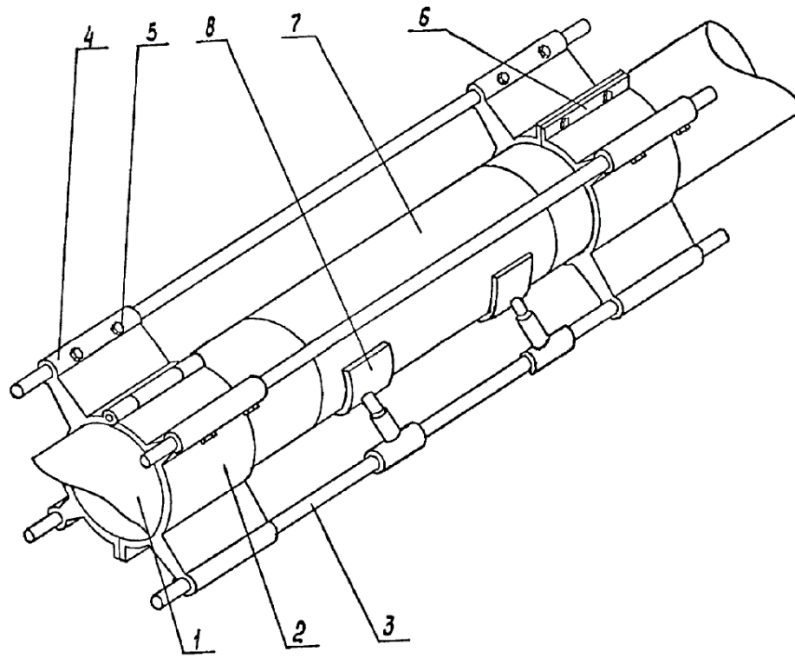


Рисунок 1.6 – Устройство с набором стрингеров и упоров [111]

1 – трубопровод; 2 – хомуты; 3 – стрингеры; 4 – приливы; 5 – стопорные винты; 6 – запорное устройство; 7 – катушка; 8 – подвижные упоры

Недостатком устройства является невозможность поддержания трубопровода на определенном расстоянии от земли без помощи трубоукладчика, а также то, что, вследствие возникновения значительных напряжений в трубопроводе при вырезке дефектного участка, возможно нарушение соосности концов трубы из-за упругой деформации стрингеров. При этом для обеспечения соосности трубопровода необходимо применение трубоукладчиков [115].

Подобная конструкция предлагается в патенте [62]. В данном случае в состав конструкции также входят лазерные датчики для обеспечения соосности стыкуемых труб [115].

В патенте [78] устройство устанавливается на несущих стойках по краям траншеи, оснащено силовой цепью для поднятия оси трубопровода, а также узлом для перемещения трубопровода в горизонтальном направлении, состоящим из рычажной лебедки и системы полиспаста, включающей два блока, один из которых подсоединен к отрезу

трубопровода, а другой подсоединен к опорной балке, закрепленной на несущих стойках [115].

Конструкция устройства представлена на рисунке 1.7.

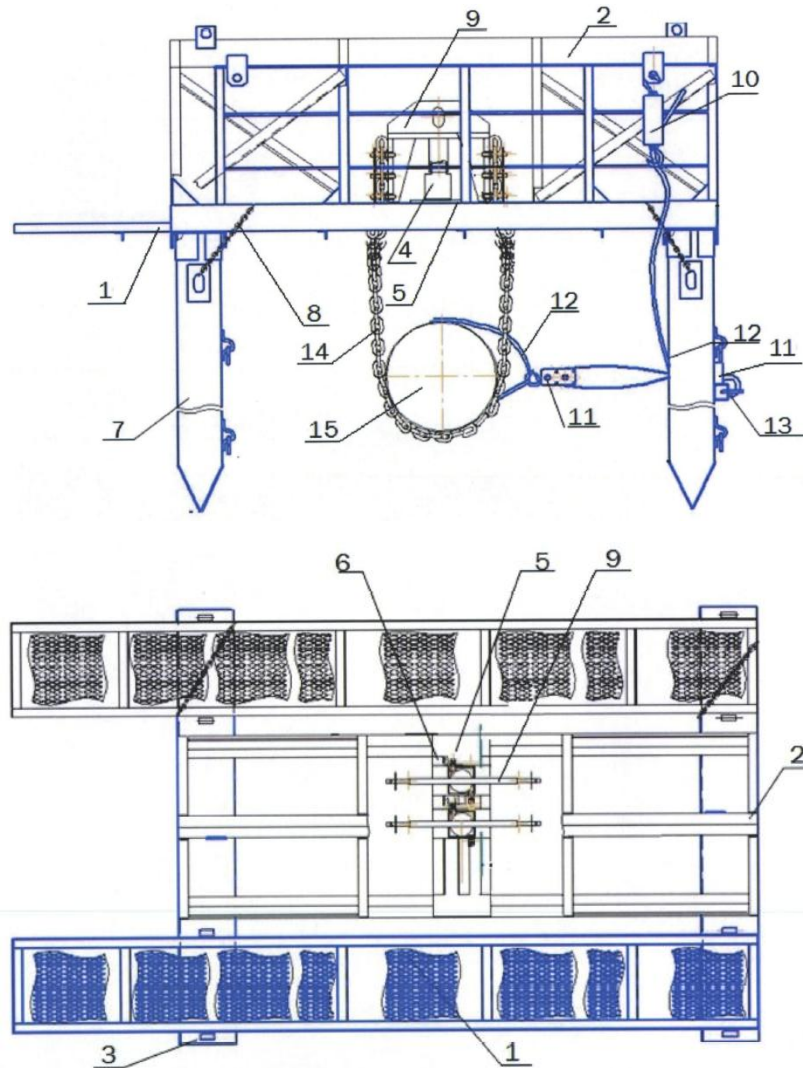


Рисунок 1.7 – Центрирующее устройство с силовыми цепями [78]

1 – площадка; 2 – основание; 3 – фиксатор; 4 – домкрат; 5 – опорный лист;  
6 – упор; 7 – несущая стойка; 8 – цепь; 9 – коромысло; 10 – рычажная  
лебедка; 11 – блок; 12 – строп; 13 – опорная балка; 14 – силовая цепь;  
15 – отрез трубопровода.

Недостатком способа является сложность конструкции, ее монтажа, а также невозможность регулировки положения трубопровода вниз по вертикали [115].

Способ замены дефектного участка трубопровода [12], включает локализацию поврежденного участка, оценку его напряженно-

деформированного состояния, вырезку поврежденного участка, центрирование труб, монтаж и сварку катушки трубопровода. При этом в процессе оценки напряженно-деформированного состояния трубопровода производится определение его упругой деформации, в зависимости от вида которой осуществляются продольные, поперечные или спиральные разрезы по трубопроводу до высвобождения имеющейся упругой деформации.

Недостатком способа является необходимость присутствия рабочего персонала в траншее в процессе выполнения надрезов, что снижает уровень безопасности работ по вырезке дефектного участка трубопровода.

Известен также способ ремонта линейного участка трубопровода на слабонесущих грунтах [72], который включает в себя локализацию аварийного участка, откачивание из него газа, вырезку поврежденного участка, монтаж и сварку новой катушки. При этом центрирование концов трубопровода с новой катушкой производится их вертикальными перемещениями с помощью гидроцилиндров. Само устройство крепится сваями, установленными на дно траншеи в минеральный грунт.

Недостатком способа является отсутствие возможности центрирования концов трубопровода после вырезки в горизонтальном направлении [115].

Способ вырезки участка трубопровода [21] заключается в установке по концам дефектного участка трубопровода машин для безогневой резки труб, последующей вырезке участка с обеих концов и вбивании в формируемые надрезы через каждые 250-300 мм клиньев из искробезопасного материала.

Недостатком способа является необходимость присутствия рабочего персонала в траншее в процессе резания трубопровода для вбивания клиньев в формируемые надрезы, что также снижает уровень безопасности ведения работ ввиду имеющейся вероятности вырывания металла трубы к концу процесса резки. Также недостатком является отсутствие возможности точного центрирования концов трубопровода, находящихся по краям от вырезаемого участка [115].

Часть специалистов предлагают решать проблему резкого смещения концов трубопровода путем его разрезания в сечении с наименьшими значениями упругих напряжений. Данный подход не решает проблему резкого смещения ввиду того, что разрезание трубопровода в сечении с наименьшими упругими напряжениями только лишь позволяет осуществить разрезание с наименьшим на ремонтируемом трубопроводе смещением его концов, которое все еще представляет опасность для рабочего персонала и может приводить к поломке режущего оборудования в особенности на участках с радиусами упругих изгибов менее  $1000D$  [7, 115, 142].

Способ ремонта [56] заключается в применении фиксирующих устройств, устанавливаемых в траншее с помощью винтовых анкеров. Устройство так же оснащено шарнирными опорами, на силовых цилиндрах, имеющих возможность регулирования по высоте, включенных в единый каркас силовой станции, а также двух или более полузахватов, имеющих замковое устройство [115].

Данное устройство представлено на рисунке 1.8.

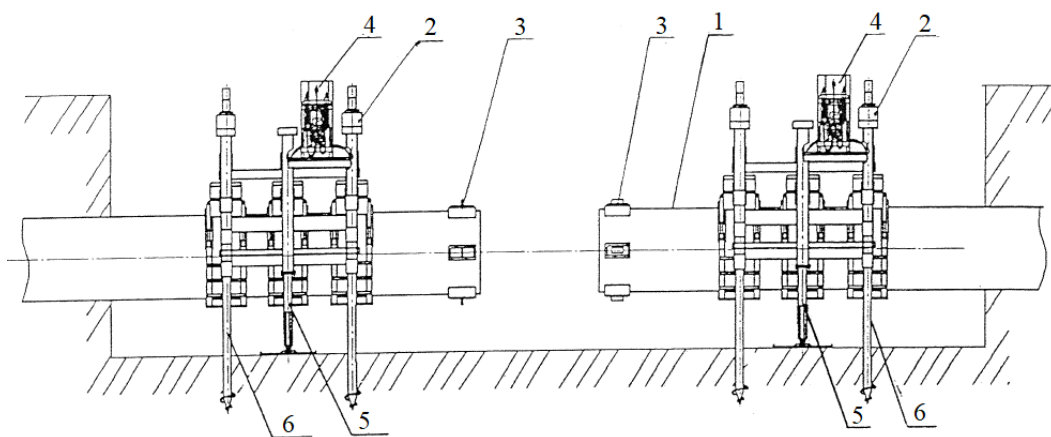


Рисунок 1.8 – Центрирующее устройство с силовыми цилиндрами [56]

1 – трубопровод; 2 – фиксирующее устройство; 3 – центровочные устройства; 4 – силовые станции; 5 – силовые цилиндры; 6 – винтовые анкеры

Достоинством устройства является возможность его надежной фиксации в грунте траншеи. Недостатком устройства является

необходимость его установки на дно траншеи, что увеличивает объем земляных и монтажных работ [115].

В патенте [70] устройство фиксируется на дно траншеи с помощью винтовых анкеров, двумя полузахватами для трубопровода, управляемых гидроцилиндрами, шток силового цилиндра, соединенный шарниром с опорными лыжами, упирающимися в дно траншеи, для регулировки положения трубопровода по вертикали. Также основание захвата опирается на швеллеры для возможности регулировки положения трубопровода в горизонтальном направлении так же с помощью силового цилиндра [115].

Описываемое устройство представлено на рисунке 1.9.

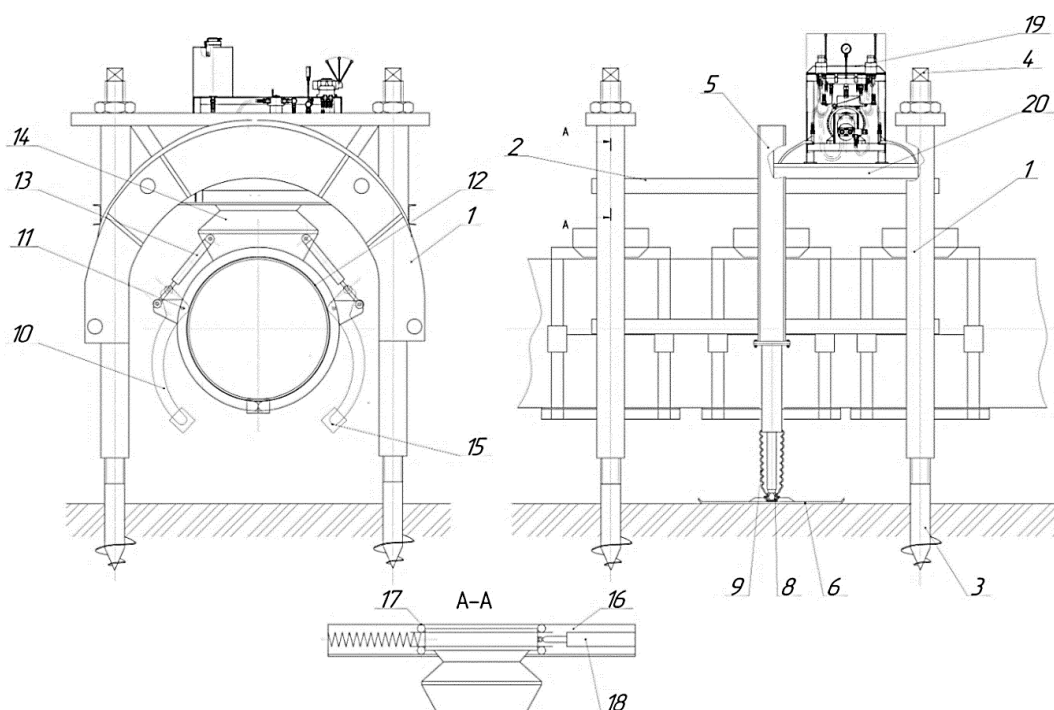


Рисунок 1.9 – Опорно-центрирующее устройство концевого участка магистрального нефте- и газопровода [70]

1 – крайние траверсы; 2 – балки; 3 – анкеры; 4 – шестигранник;  
5 – внутренние траверсы; 6 – опорные лыжи; 7 – силовые цилиндры;  
8 – шарнирная связь; 9 – гофр; 10 – створки; 11 – ось; 12 – дуга; 13 – силовые цилиндры; 14 – основание; 15 – замки; 16 – швеллеры;  
17 – ролики; 18 – цилиндр; 19 – силовая станция; 20 – платформа

Достоинством устройства является простота регулировки положения трубопровода как по вертикали, так и по горизонтали. Недостатком

устройства является невозможность его установки опорами по краям траншей, а не на ее дно, что также увеличивает объем земляных работ и сложность монтажа [115].

Таким образом, в результате проведенного анализа можно сделать вывод, что на сегодняшний день отсутствуют способы и устройства для вырезки дефектного участка магистрального трубопровода, которые являлись бы одновременно безопасными и эффективными как технологически, так и экономически. Для реализации способа, удовлетворяющего данным критериям, необходима разработка таких устройств, которые позволили бы зафиксировать положение концов трубопровода перед его разрезанием и осуществить их дальнейшее центрирование относительно друг друга перед приваркой нового участка. Данные устройства должны устанавливаться с минимальным объемом дополнительных земляных работ, обладать удобством их транспортировки, монтажа и демонтажа, простотой конструкции, позволяющей вести работы в том числе и в осложненных условиях, и исключать присутствие рабочего персонала в траншее в процессе вырезки дефектного участка [115].

Для оценки нагрузок, воспринимаемых устройствами в момент резкого смещения концов трубопровода необходима разработка методики, позволяющей оценить данные нагрузки на основе данных о пространственном положении магистрального трубопровода, его наружном и внутреннем диаметрах трубопровода и длине ремонтируемого участка. Также данная методика позволит оценить расстояния между устройствами, при которых наблюдаются минимальные при конкретном случае ремонта нагрузки на них при удержании концов трубопровода от резкого смещения, и оценить усилия, необходимые для центрирования концов трубопровода друг с другом перед приваркой нового участка.

### **1.5 Анализ применимости существующих методов оценки пространственного положения магистральных трубопроводов при производстве ремонтных работ с вырезкой их дефектных участков**

На сегодняшний день существует множество способов определения высотного-планового положения подземных магистральных трубопроводов. Стоит отметить, что большинство из них реализуются в процессе эксплуатации магистрального трубопровода. При этом, говоря о подземных трубопроводах, мониторинг их высотного-планового положения производится, когда они находятся в закопанном состоянии. При откапывании трубопровода для производства ремонтных работ высотное-плановое положение откапанного дефектного участка трубопровода меняется ввиду проседания трубопровода и отсутствия отпора со стороны грунта. В связи с этим данные о высотном-плановом положении трубопровода, полученные в процессе его эксплуатации не являются объективными при использовании их в процессе ремонта с вырезкой дефектного участка.

Ввиду вышесказанного необходимо проанализировать каждый из применяемых в настоящее время способов определения высотного-планового положения подземных магистральных трубопроводов и выявить их достоинства и недостатки. К таким способам относятся следующие:

- Определение положения трубопровода по результатам внутритрубной диагностики;
- Применение инклинометрии;
- Использование волоконно-оптических сенсоров;
- Съёмка положения трубопровода с поверхности грунта;
- Применение тахеометрической съёмки трубопровода;
- Применение лазерного сканирования.

Далее проанализируем достоинства и недостатки каждого из перечисленных методов.



*Определение положения трубопровода по результатам внутритрубной диагностики.*

Простым в реализации методом контроля и оценки НДС магистральных трубопроводов является мониторинг пространственного положения трубопровода в рамках проведения внутритрубной диагностики [73, 74, 114, 128, 131]. Данный метод заключается в пропуске в полость трубопровода специального снаряда, с помощью которого возможно не только получить данные о высотных отметках трубопровода вдоль его длины, но и выявить имеющиеся в теле трубопровода дефекты в том числе и стресс-коррозионные [43, 18, 107, 149]. Для определения высотного положения трубопровода в пропускаемом снаряде используется система, состоящая из одометров, позволяющих измерять линейную координату, и гироскопов, осуществляющих измерение углового положения трубопровода, что дает возможность получить данные о высотном и плановом положении трубопровода. При этом для реализации данного метода оценки положения трубопровода не требуется больших инвестиций в закупку оборудования, так как проведение внутритрубной диагностики является неотъемлемой составляющей процесса эксплуатации магистральных трубопроводов [116].

Внутритрубная диагностика может применяться совместно с методом аэрокосмической съемки, что позволяет повысить точность определения пространственного положения магистрального трубопровода. При этом так же осуществляют пропуск инспекционного снаряда с системой навигации в полость трубопровода, размещают стационарно вдоль трассы трубопровода устройства для определения планово-высотного положения, имеющие геодезическую привязку с помощью спутниковых систем GPS (Global Positioning System)/ГЛОНАСС относительно реперов [57, 127]. На устройствах для определения планово-высотного положения монтированы блоки связи с инспекционным снарядом, которые передают ему корректирующие данные о координате геодезической привязки. После чего

данные с инспекционного снаряда и данные о геодезической привязке передают в наземный пункт обработки для определения планово-высотного положения магистрального трубопровода [5, 45, 48, 95, 116].

#### *Применение метода инклинометрии.*

Автором работы [38] предлагается устанавливать инклинометрические датчики вдоль магистральных трубопроводов для мониторинга его высотного-планового положения, а также напряженно-деформированного состояния. Данные приборы позволяют измерять угол наклона трубопровода в точке их установки [116, 117, 118, 135]. Инклинометры устанавливались вдоль верхней образующей трубы лабораторного стенда, в выбранных точках, после чего труба изгибалась до определенной стрелы прогиба и осуществлялись измерения тангенсов углов наклона трубы. Далее значения полученных тангенсов углов наклона аппроксимировались полиномом пятой степени и после его интегрирования осуществлялась оценка величин изгибающих напряжений в стенке трубопровода, а также был получен полином, описывающий положение исследуемой трубы.

Авторы работы [14] провели сравнение результатов, полученных с инклинометрических датчиков, установленных на трубопровод с результатами моделирования изгиба трубопровода в программном комплексе SolidWorks. Рассчитанные по значениям углов наклона трубопровода его высотные отметки по двум методам их определения различаются менее чем на 2,9%, что свидетельствует о достаточной точности их определения с помощью инклинометрических датчиков [116].

#### *Использование волоконно-оптических сенсоров.*

Волоконно-оптические сенсоры представляют собой кабели, которые, как правило, используются для передачи информации, которая осуществляется в виде световых оптических сигналов. Для обеспечения максимальных расстояния и скорости передачи данных конструкция данных кабелей позволяет минимизировать эффект рассеяния света [20, 93, 105]. Рассеивание света может происходить ввиду особенностей

окружающей среды, а также деформации самого кабеля. Такая особенность рассеивания обусловлена эффектом Мандельштама-Бриллюэна, который заключается во взаимодействии оптического излучения с собственными колебаниями твердых и жидких сред, в результате чего происходит изменение частоты излучения [24, 25]. Это позволяет осуществлять мониторинг величин напряжений в стенке трубопровода и его высотнопланового положения на основе изменения частоты светового сигнала при деформации кабеля, установленного на трубопровод, исходя из заранее полученных корреляционных зависимостей данных параметров [41, 152].

*Съемка положения трубопровода с поверхности грунта.*

Определение пространственного положения подземного трубопровода возможно также с поверхности грунта без его откапывания, что позволяет исключить затраты труда и финансов на проведение земляных работ. Методика определения положения трубопровода регламентируется методикой ВРД 39-1.10-026-2001 [19]. Для измерения глубины заложения трубопровода используется трассоискатель [4, 109]. На основе данных трассоискателя возможно оценить положение трубопровода только в вертикальной плоскости. Для определения положения подземного трубопровода в горизонтальной плоскости помимо трассоискателя используется спутниковая навигационная система GPS. Приемник GPS устанавливается на дневную поверхность в начальной точке измерения глубины заложения трубопровода. Далее эту точку принимают за реперную и для последующих точек измерений определяют курсовой угол, широту, долготу, альтитуду и глубину заложения трубопровода, на основе которых осуществляют расчет горизонтальных координат расположения трубопровода [4, 109, 154].

Стоит отметить, что данный метод определения пространственного положения трубопровода имеет высокую чувствительность к шагу измерений по длине трубопровода, а также к погрешности самого оборудования [88].

*Применение тахеометрической съемки трубопровода.*

Основными инструментами являются рулетки, теодолиты, нивелиры, электронные тахеометры, трассоискатели, GPS ГЛОНАСС системы. Менее распространены, но также используются, лазерные сканеры [77]. Аэрофотосъемка, как правило, используется при проектировании и создании геоинформационных систем (ГИС) [3, 53, 124, 145].

*Применение лазерного сканирования.*

Лазерное сканирование – технология, которая позволяет с высокой точностью и производительностью получать облака точек поверхности сканируемых объектов для дальнейшего их использования в различных прикладных и научных задачах. Лазерное сканирование заключается в сканировании поверхности объекта с использованием специальных устройств – лазерных сканеров [67, 94, 106].

Координаты облака точек могут быть использованы для построения цифровых трехмерных моделей [68, 130].

Ввиду того, что применяемые при сканировании лазерные сканеры – это инструменты прямой видимости, для сканирования объектов со всех сторон требуется последовательное перемещение сканера [27, 32, 33, 133].

По принципу измерения расстояния до объекта лазерные сканеры подразделяются на две группы: импульсные и фазовые. Импульсные лазерные сканеры рассчитывают координату точки на поверхности сканируемого объекта по времени прохождения лазерным лучом от сканера до объекта и обратно. Фазовые лазерные сканеры определяют координаты точек поверхности объекта на основе количества целых длин волн между сканером и объектом и разности фаз излученной и принятой волны модулирующего колебания [23, 26, 67, 96].

Принцип работы лазерного сканера представлен на рисунке 1.10.

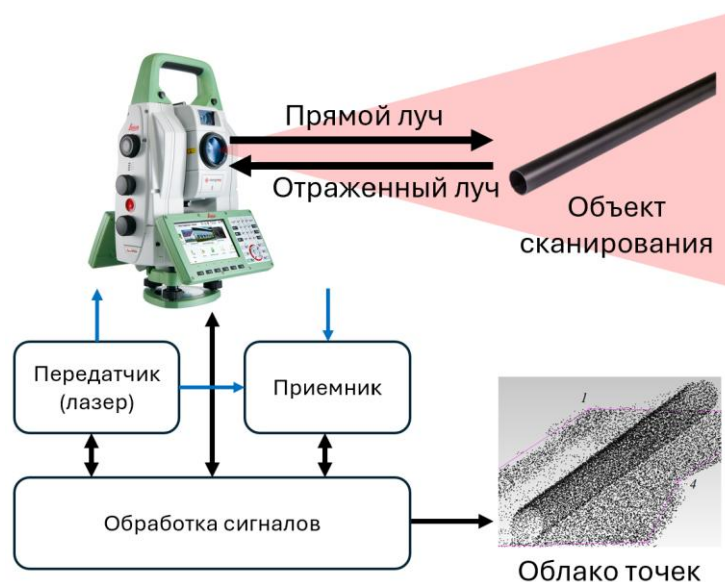


Рисунок 1.10 – Принцип работы лазерного сканера

Примеры облаков точек, полученных по результатам лазерного сканирования, представлены на рисунке 1.11.

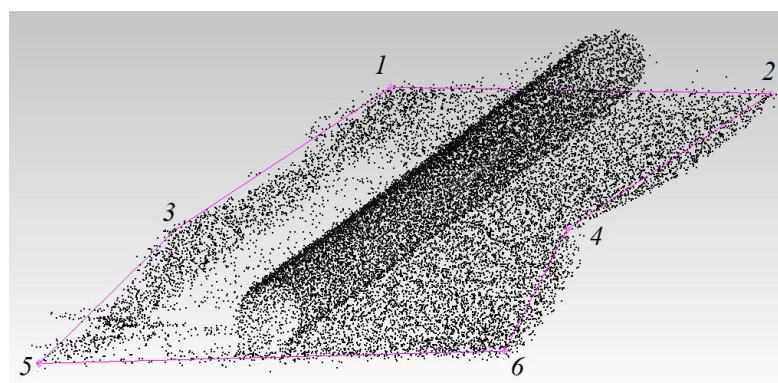


Рисунок 1.11 – Примеры облаков точек, полученных по результатам лазерного сканирования

Возникающие в процессе лазерного сканирования погрешности измерений координат облака точек сканируемого объекта делятся на четыре категории: инструментальные, связанные с отражающей поверхностью, условия окружающей среды и методологические ошибки [9, 22, 52, 94].

Причиной возникновения инструментальных ошибок являются несовершенства используемых лазерных сканеров, объединяющих в себе комплекс измерительных блоков и систем [28, 94].

Влияние отражающей поверхности на точность лазерного сканирования обусловлено оптическими свойствами материалов сканируемых объектов. В случае с темными (черными) поверхностями

происходит поглощение направленного от лазерного сканера луча, ввиду чего определение координат точки будет искажено шумом. Более точные результаты получаются при сканировании объектов с хорошей отражательной способностью. Тем не менее при достаточно высокой отражательной способности объекта сканирования (чистая металлическая поверхность, зеркальные поверхности) происходит отклонение лазерного луча, что ведет к высоким погрешностям измерения [94, 122, 137].

На результаты определения координат облака точек лазерного сканирования оказывают влияние условия окружающей среды, в число которых входят температура окружающего воздуха, влажность, вибрации и другие внешние воздействия.

К числу методологических ошибок относят погрешности, связанные с методом измерений или опытом работы оператора с лазерным сканером. Следует отметить, что технология лазерного сканирования постоянно развивается: уменьшается вес сканера, увеличивается точность и дальность измерений и т.д. [148].

Выделяют три основные группы лазерного сканирования:

- наземное лазерное сканирование;
- мобильное лазерное сканирование;
- воздушное лазерное сканирование.

Выбор метода лазерного сканирования обусловлен объемом работ и требуемой точностью сканирования. При сканировании протяженных объектов, например, надземных магистральных трубопроводов используется воздушное лазерное сканирование [68, 119, 120]. В случае сканирования отдельных деталей и объектов с высокой точностью порядка микрометров используется мобильное сканирование [34, 65]. Для сканирования промышленных объектов, производственных площадок с миллиметровой точностью и обеспечением высокой дальности сканирования используется наземное сканирование [113].

Наземное лазерное сканирование производится с применением стационарных сканеров, установленных на треноге, и позволяет получить облако точек зданий, сооружений, промышленных объектов за счет высокой дальности сканирования [60, 89]. Характеристики применяемых сканеров представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристики сканеров, применяемых при наземном сканировании [97, 100, 101]

Модель	Скорость сканирования	Дальность	Точность	Поле зрения (вертикаль/горизонталь)
Leica RTC360	до 2 000 000 точ/с	130 м	1 мм / 2,9 мм на 20 м	300° / 360°
Leica MS 60	до 30 000 точ/с	2 000 м	1 мм / 2 мм на 500 м	270° / 360°
Faro Focus M70	488 000 точ/с	70 м	1 мм / 3 мм на 70 м	300° / 360°

Лазерные сканеры для наземного сканирования представлены на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 – Внешний вид лазерных сканеров для наземного сканирования

а – Leica RTC360; б – Leica MS60; в – Faro Focus M70

Примеры характеристик мобильных лазерных сканеров представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Характеристики мобильных лазерных сканеров [99, 103]

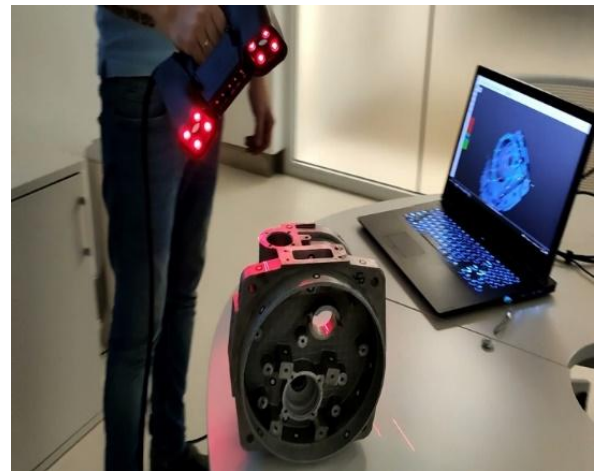
Модель	Скорость сканирования	Дальность	Точность	Расстояние между точками	Привязка к нулю по маркерам
Hexagon RS6 Laser Scanner	до 1 214 400 точ/с	165 ± 50 мм	0,026 мм	0,027 мм	Нет
ScanForm L5	до 1 100 000 точ/с	300 мм	0,04 мм	0,15 мм	Да

Внешний вид мобильных лазерных сканеров представлен на рисунке

1.13.



(а)



(б)

Рисунок 1.13 – Внешний вид мобильных лазерных сканеров

а – Hexagon RS6 Laser Scanner; б – ScanForm L5

Примеры характеристик лазерных сканеров для воздушного сканирования представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Характеристики лазерных сканеров для воздушного сканирования [98, 102]

Модель	Скорость скан-ия	Расст.	Точность	Навигация	Поле зрения (верт./гориз.)
Greenvalley Liair 50	до 300 000 точ/с	≤100 м	3 см	GPS, ГЛОНАСС, ГАЛИЛЕО, БД	30° / 360°



*Продолжение таблицы 1.4*

Phoenix miniRANGER -3 LITE	до 300 000 точ/с	2 - 290 м	15 мм	GPS, ГЛОНАСС, ГАЛИЛЕО, БД	30° / 360°
----------------------------------	------------------------	--------------	-------	------------------------------------	------------

Внешний вид воздушных лазерных сканеров представлен на рисунке 1.14.



Рисунок 1.14 – Внешний вид воздушных лазерных сканеров

а – Greenvalley Liair 50; б – Phoenix miniRANGER-3 LITE

При определении положения трубопровода в пространстве методом воздушного лазерного сканирования применяются сканеры, устанавливаемые на беспилотных летательных аппаратах. При этом используются специальные устройства, устанавливаемые основанием на подземный трубопровод и имеющие в верхней части светоотражающую пластину [10]. Для определения высотного положения трубопровода наземными сканерами их установку необходимо осуществлять так, чтобы весь исследуемый участок трубопровода находился в зоне их видимости.

Схема проведения мониторинга на основе воздушного лазерного сканирования и данных внутритрубной диагностики представлена на рисунке 1.15.

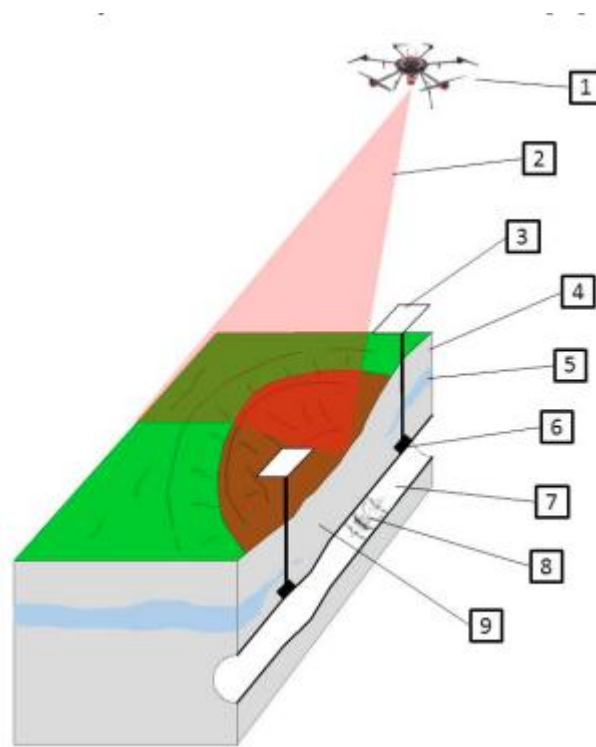


Рисунок 1.15 – Схема проведения мониторинга на основе воздушного лазерного сканирования и данных внутритрубной диагностики [10]  
 1 – летательный аппарат со сканером и фотокамерой; 2 – сканирующий луч; 3 – устройство определения планово-высотного положения трубопровода; 4 – грунты; 5 – линза высоко льдистых грунтов; 6 – хомут крепления устройства определения планово-высотного положения трубопровода; 7 – трубопровод; 8 – прибор для проведения ВТД; 9 – зона растепления грунтов

Таким образом, можно сделать вывод, что применяемые в настоящее время методы определения высотного-планового положения подземных магистральных трубопроводов не обеспечивают объективных данных о положении участка трубопровода после его откапывания. Тем не менее, среди перспективных способов для обеспечения достаточно точной и быстрой оценки пространственного положения откопанного участка трубопровода следует выделить применение лазерного сканирования. Такой способ возможно реализовать во время производства ремонтных работ, что позволит получить актуальные данные о положении участка

трубопровода непосредственно во время производства ремонтных работ [132, 142, 143].

Метод оценки пространственного положения надземного магистрального трубопровода на основе облака точек его лазерного сканирования был предложен в работе [145]. Путем анализа облака точек трубопровода были получены точки его центральной оси, которые аппроксимировались кубическими сплайнами. Это позволило оценить координаты точек центральной оси трубопровода с точностью до 15-20 мм.

Использование данного способа при анализе пространственного положения откопанного трубопровода при производстве его ремонтных работ возможно только в определенных пределах. Данные пределы его использования характеризуются тем, что сканирование трубопровода в ремонтном котловане возможно только с бровки траншеи, ввиду чего ограничивается угол сканируемого сектора трубопровода. Так же на результаты оценки координат его центральной оси оказывают влияние неровности его изоляционного покрытия.

Говоря об аппроксимации точек центральной оси трубопровода, то в большинстве работ подтверждается высокая точность оценки пространственного положения центральной оси аппроксимацией ее точек полиномами четвертой степени, при использовании которых достигаются значения коэффициента достоверности аппроксимации  $R^2$  более 0,95. Но использование полинома четвертого порядка не всегда целесообразно. Так, например, при определении радиуса упругого изгиба трубопровода данный порядок полинома не позволит оценить радиус с погрешностью менее 20% ввиду большей чувствительности данного параметра к точности аппроксимации точек центральной оси трубопровода [36-38, 40, 61, 62, 116, 135]. В связи с вышесказанным необходимой также является оценка точности определения усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования на основе результатов аппроксимации точек его центральной оси полиномом четвертого порядка.

Таким образом, стоит отметить, что в настоящее время отсутствует рабочая и простая в реализации методика оценки пространственного положения центральной оси откопанного участка трубопровода на основе координат облака точек его лазерного сканирования в условиях его ремонта с вырезкой дефектного участка [142].

### **1.6 Цель и задачи исследований**

В результате проведенного анализа установлено, что в настоящее время отсутствуют способы вырезки дефектных участков трубопроводов, которые являлись бы безопасными и эффективными с точки зрения применяемых технологий и экономических затрат.

Для реализации этого способа необходимо разработать устройства, которые позволили бы приложить к трубопроводу усилия, необходимые для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования, и математической модели для расчета этих усилий с учетом пространственного положения ремонтируемого участка трубопровода.

Анализ способов определения пространственного положения трубопроводов показал, что применяемые в настоящее время способы не обеспечивают объективных данных о положении участка трубопровода после его откапывания. Тем не менее, среди перспективных способов для обеспечения достаточно точной и быстрой оценки пространственного положения откопанного участка трубопровода следует выделить применение лазерного сканирования. Но реализация данного способа затрудняется ввиду отсутствия рабочей методики обработки опытных данных лазерного сканирования трубопровода в процессе его ремонта.

На основании вышесказанного целью работы является обоснование способа ремонта магистральных трубопроводов, обеспечивающего безопасный процесс вырезки дефектных участков.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ источников литературы и патентных материалов по теме исследования;
2. Разработать схему конструкции устройства для фиксирования положения трубопровода перед его разрезанием, а также центрирования его концов перед приваркой нового участка;
3. Разработать математическую модель для оценки усилий, создаваемых захватами разработанных устройств для устранения резкого смещения концов трубопровода при его разрезании и их центрирования перед приваркой нового участка на основе коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение его центральной оси;
4. Разработать метод оценки значений коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси откопанного участка трубопровода на основе координат облака точек его лазерного сканирования;
5. Разработать рекомендации по осуществлению и оценить параметры технико-экономической эффективности предлагаемого способа ремонта магистральных трубопроводов.

### **1.7 Выводы по главе 1**

1. Вырезка дефектного участка магистрального трубопровода является наиболее применяемым в настоящее время методом устранения дефектов, что обуславливает особую актуальность разработки техник и технологий, повышающих безопасность проведения ремонтных работ, а также технологическую и экономическую эффективность метода ремонта;
2. Процесс производства ремонтных работ с вырезкой дефектного участка магистрального трубопровода осложняется резким смещением концов трубопровода после вырезки друг относительно друга, что требует фиксирования их положения перед разрезанием и дальнейшего центрирования трубоукладчиков;
3. Резкое смещение концов трубопровода обусловлено наличием его упругого изгиба, возникающего в результате процессов, протекающих в

грунте, таких как отток лишней влаги под трубопроводом, уплотнение грунта, термокарсты, термоэрозия, криогенное пучение грунтов и т.д.;

4. Требуется разработка специальной техники, позволяющей прикладывать к трубопроводу усилия для устранения резкого смещения его концов и их дальнейшего центрирования, рассчитываемые на основе координат точек центральной оси трубопровода;

5. Среди существующих методов оценки пространственного положения магистрального трубопровода наиболее оперативным и достоверным в полевых условиях является его лазерное сканирование. Но для точной оценки пространственного положения откопанного участка трубопровода требуется разработка способа проведения лазерного сканирования и обработки полученного облака точек, а также определение степени влияния неровностей изоляционного покрытия и угла сканируемого сектора на результат определения координат точек центральной оси трубопровода и расчета на их основе усилий, необходимых для устранения смещения его концов и их центрирования.

## ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РЕМОНТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСТРОЙСТВ ФИКСИРОВАНИЯ И ЦЕНТРИРОВАНИЯ ИХ КОНЦОВ

### 2.1 Разработка схемы конструкции устройства фиксации и центрирования концов трубопровода

Исходя из выявленных достоинств и недостатков предлагаемых в настоящее время устройств, была разработана конструкция устройства фиксации и центрирования концов трубопровода при вырезке его дефектного участка, представленная на рисунках 2.1-2.3 [90, 92, 142].

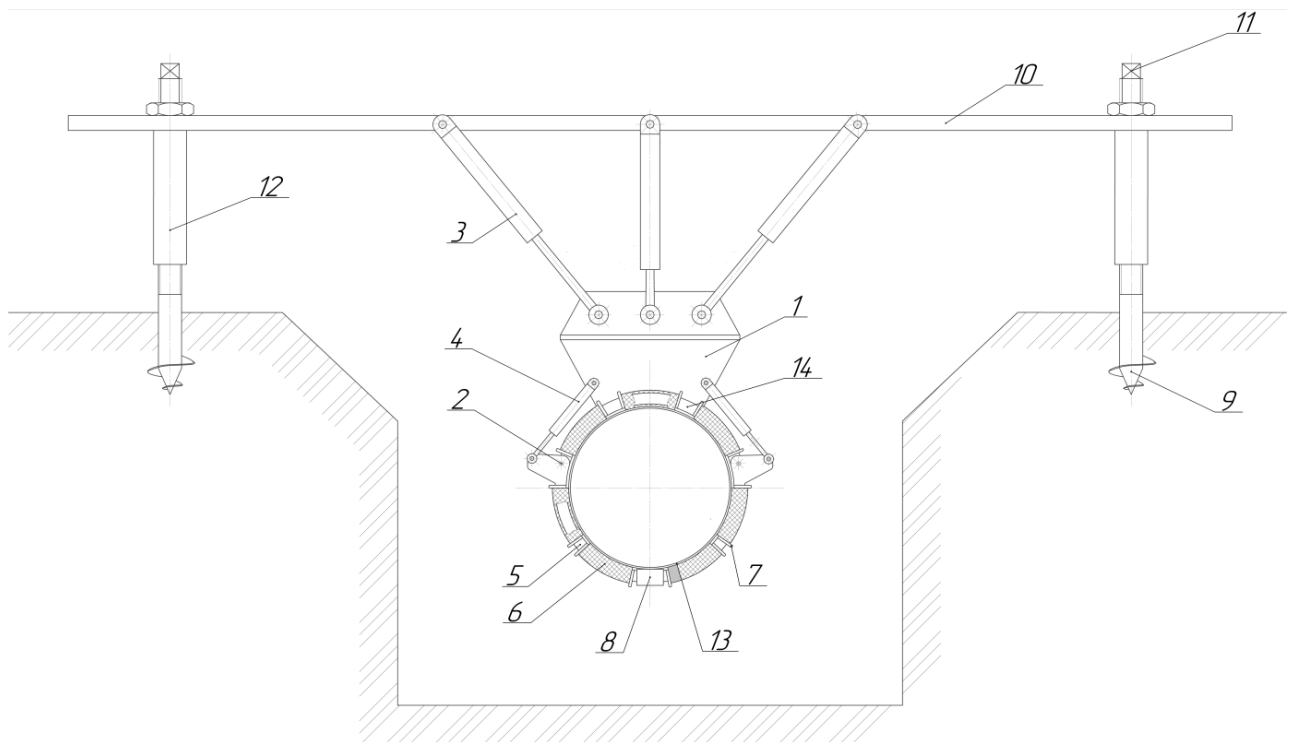


Рисунок 2.1 – Устройство фиксации и центрирования концов трубопровода при вырезке его дефектного участка [142]

- 1 – основание захвата; 2 – ось захвата; 3 – большой силовой цилиндр;  
 4 – малый силовой цилиндр; 5 – створка захвата; 6 – ролик захвата;  
 7 – стопор роликов захвата; 8 – замок захвата; 9 – буровой анкер;  
 10 – платформа; 11 – шестигранник; 12 – направляющий цилиндр;  
 13 – трубопровод; 14 – дуга захвата

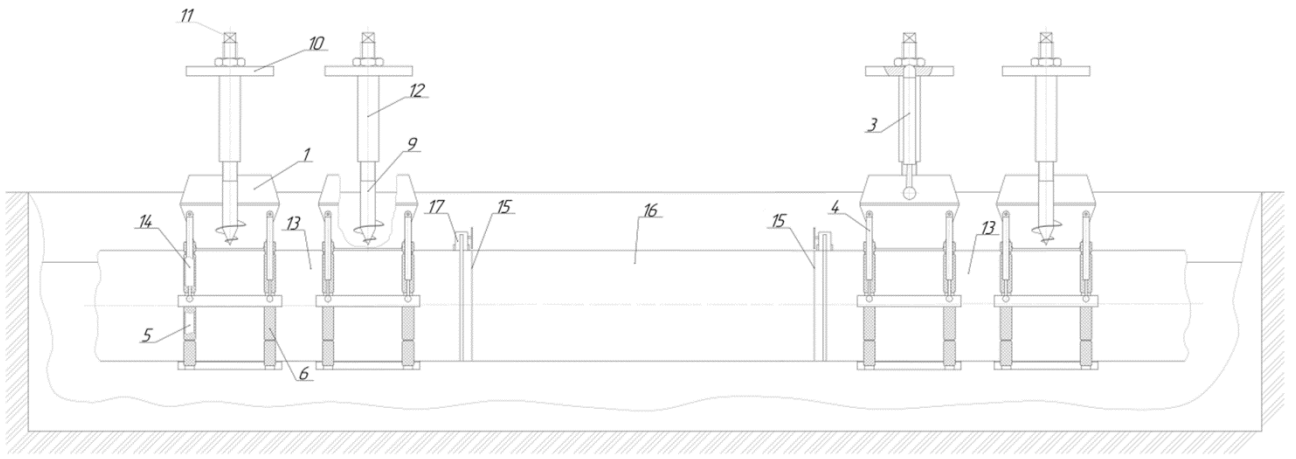
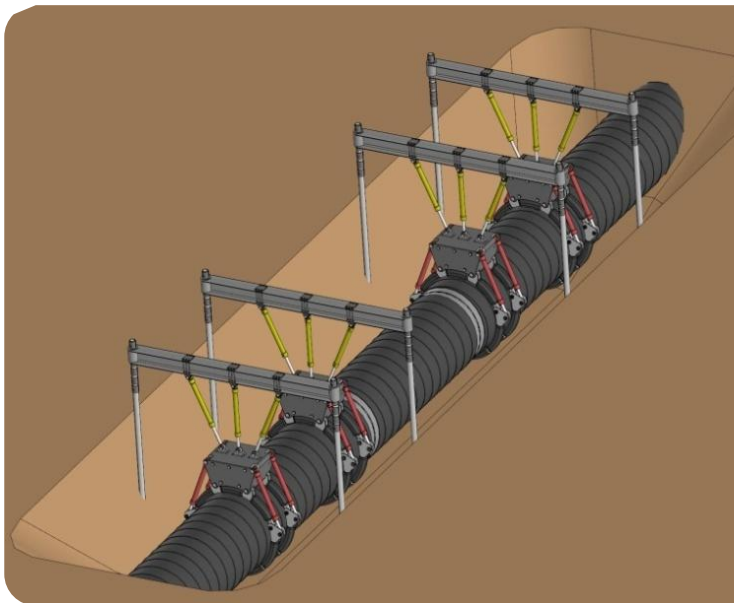
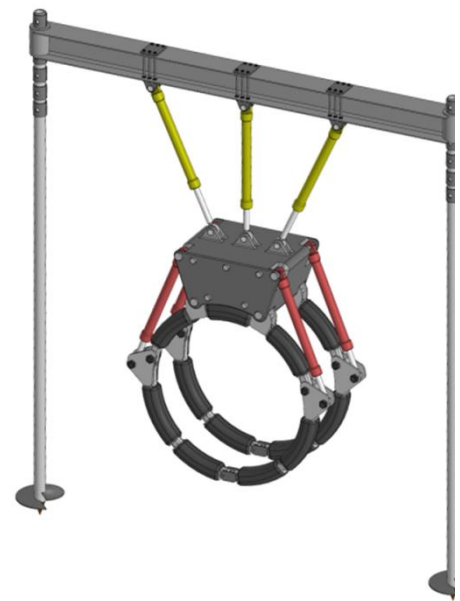


Рисунок 2.2 – Устройства фиксирования и центрирования концов трубопровода в процессе его разрезания [142]

1 – основание захвата; 3 – большой силовой цилиндр; 4 – малый силовой цилиндр; 5 – створка захвата; 6 – ролик захвата; 9 – буровой анкер; 10 – платформа; 11 – шестигранник; 12 – направляющий цилиндр; 13 – трубопровод; 14 – дуга захвата; 15 – сечение разрезания трубопровода; 16 – вырезаемый участок трубопровода; 17 – машинка для резки труб



(а)



(б)

Рисунок 2.3 – Внешний вид устройств фиксирования и центрирования  
а – устройства, смонтированные на трубопровод; б – внешний вид устройства



В соответствии с рисунками 2.1-2.3 осуществляется установка с помощью манипулятора по обеим сторонам от вырезаемого участка двух устройств дугой захвата 14, соединенной с основанием захвата 1, на верхнюю образующую трубопровода 13 в рассчитанных сечениях трубопровода [30].

Со стороны каждого сечения разрезания трубопровода должно находиться не менее одного устройства фиксирования и центрирования на расстоянии не менее 0,5 м от места разрезания. После чего происходит обхватывание трубопровода створками захватов 5.

Далее осуществляется монтаж и забуривание в грунт посредством бурового ротатора, устанавливаемого на шестигранник, буровых анкеров 9. После этого текущее положение поршней больших гидроцилиндров 3 устройств фиксирования и центрирования фиксируется путем закрытия гидрозамков гидросистемы, тем самым осуществляется фиксирование положения концов трубопровода в процессе разрезания и после него.

Следующим шагом осуществляется установка режущего оборудования 17 в сечениях разрезания трубопровода 15, после чего осуществляется разрезание трубопровода [142]. Далее с помощью манипулятора осуществляется демонтаж вырезанного участка трубопровода.

С помощью манипулятора осуществляется монтаж нового участка к месту сварки его торцов с концами трубопровода и центрирование концов трубопровода с торцами бездефектного участка путем подачи рассчитанных ранее усилий центрирования концов трубопровода на большие гидроцилиндры 3 соответствующих устройств фиксирования и центрирования.

После чего производят сварку торцов бездефектного участка с концами трубопровода, демонтаж буровых анкеров 9 устройств фиксирования и центрирования посредством гидравлического ротатора и самих устройств фиксирования и центрирования. Далее осуществляется проверка качества сварных стыков и их изоляция, а также закапывание

отремонтированного участка трубопровода. Управление гидроцилиндрами устройств осуществляется системой автоматики путем регулирования поршней гидроцилиндров в соответствии с рассчитанными величинами усилий центрирования концов трубопровода или с помощью дистанционного управления с пульта.

В случае использования системы автоматики в качестве исходных данных для расчета усилий, необходимых для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования, используются данные о пространственном положении трубопровода в ремонтном котловане, полученные в результате его лазерного сканирования. Данный метод оценки пространственного положения трубопровода, как было доказано в предыдущей главе, является наиболее точным и оперативным для условий его ремонта [142].

Порядок проведения ремонтных работ с применением устройств фиксирования и центрирования с учетом данных о пространственном положении трубопровода в ремонтном котловане, полученных в результате лазерного сканирования трубопровода, представлен в следующем разделе.

## **2.2 Разработка способа ремонта магистральных трубопроводов с вырезкой их дефектных участков с применением устройств фиксирования и центрирования**

Предлагаемая последовательность работ по ремонту магистральных трубопроводов с вырезкой их дефектных участков представлена на рисунке 2.4 [91, 115, 142].

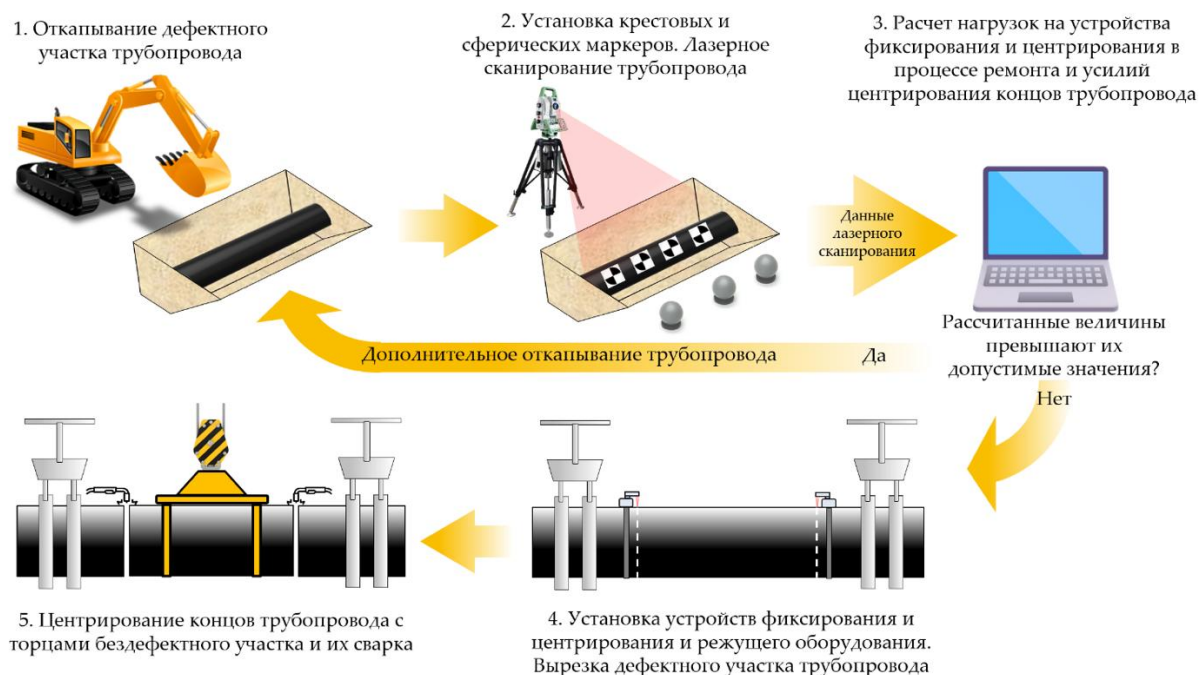


Рисунок 2.4 – Предлагаемая последовательность работ по ремонту магистральных трубопроводов с вырезкой их дефектных участков [142]

После локализации дефектного участка магистрального трубопровода, например, методом внутритрубной диагностики, проводится его откапывание [142].

Следующим шагом осуществляется наклейка крестовых маркеров по краям ремонтируемого участка трубопровода, а также в сечениях, в которых планируется его разрезание. Также осуществляется установка не менее трех сферических маркеров на краю траншеи для привязки положения лазерного сканера при его перемещении к общей системе координат. Осуществляют последовательное сканирование участка трубопровода вдоль его длины над траншеей от одного края котлована до другого с шагом не более 10 м на расстоянии не более 1 м от края котлована сканером лазерного типа, позволяющего сканировать положение трубопровода в пространстве путем получения облака точек трубопровода в соответствии с рисунком 2.5.

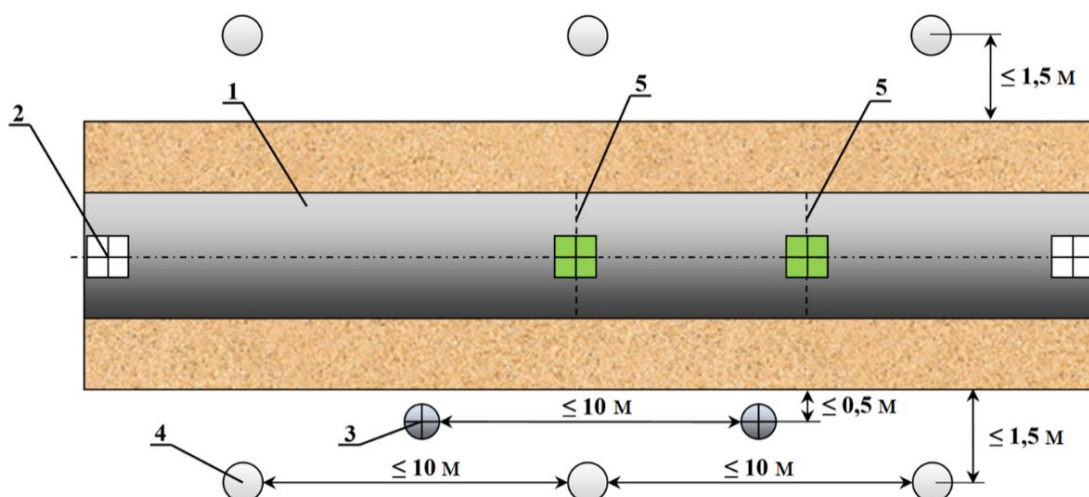


Рисунок 2.5 – Схема осуществления лазерного сканирования  
ремонтируемого участка трубопровода [142]

1 – ремонтируемый участок трубопровода; 2 – крестовый маркер;  
3 – сферический маркер; 4 – лазерный сканер; 5 – место разрезания

После сканирования трубопровода вдоль одной его стороны осуществляется его сканирование с противоположной стороны. В процессе сканирования полученное облако точек передается на персональный компьютер, который осуществляет дальнейшую его обработку. Объединение облаков точек, полученных со сканера лазерного типа в каждом из его положений вдоль длины трубопровода, осуществляется посредством наложения друг на друга точек, являющихся центрами сферических маркеров 3. Результатом обработки облака точек трубопровода является уравнение полинома четвертой степени, описывающего изгиб центральной оси трубопровода [142].

Исходя из полученных коэффициентов полинома осуществляется расчет усилий, прикладываемых к трубопроводу захватами устройств для устранения смещения его концов и их центрирования.

В случае если рассчитанные величины усилий не превышают максимальные для устройств фиксирования и центрирования, осуществляется монтаж устройств на трубопровод в соответствии с порядком описанным в предыдущем разделе. Иначе производится дополнительное откапывание участка трубопровода.

Осуществляется установка режущего оборудования на ремонтируемый трубопровод, вырезка дефектного участка и его демонтаж манипулятором. После чего рассчитанные величины усилий для центрирования концов трубопровода подаются на гидроцилиндры устройств и осуществляется перемещение концов трубопровода в положение их соосности, очистка внутренней поверхности и герметизация полости концов трубопровода. Следующим шагом производится монтаж бездефектного участка, установка наружных центраторов, приварка торцов бездефектного участка к торцам концов трубопровода, демонтаж наружных центраторов, демонтаж всех устройств фиксации и центрирования и закапывание отремонтированного трубопровода [91, 142].

## **2.3 Разработка математической модели расчета усилий для устранения смещения концов трубопровода и их центрирования**

### **2.3.1 Динамический расчет усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода**

Для устранения резкого смещения концов трубопровода относительно друг друга при его разрезании захваты предлагаемых устройств опускаются гидроцилиндрами до верхней образующей трубопровода, после чего он обхватывается створками захватов. Поршни гидроцилиндров фиксируются в данном положении и должны оставаться неподвижными для удержания трубопровода от деформаций в момент смещения его концов в конце процесса резки. Такое фиксирование положения штоков обеспечивается за счет применения гидрозамков в гидравлической системе предлагаемых устройств. Гидрозамки препятствуют дополнительному притоку и оттоку имеющейся гидравлической жидкости в гидроцилиндрах, что делает возможным обеспечение фиксирования положения их штоков и, как следствие, фиксирование пространственного положения сечений трубопровода, в которых установлены захваты [142].

При условии предварительного фиксирования штоков гидроцилиндров в положении, при котором трубопровод находится до его

резки, дальнейшая деформация трубопровода при смещении его концов влечет за собой резкое повышение давления в гидросистеме, максимальная величина которого должна восприниматься ей и, в частности, гидроцилиндрами и гидрозамками устройств [142].

Целью разработки математической модели является получение зависимостей, позволяющих определить величины усилий, прикладываемых к трубопроводу со стороны захватов устройств для устранения резкого смещения концов трубопровода на основе величин коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение его центральной оси в ремонтном котловане, наружного и внутреннего диаметров трубопровода, модуля Юнга материала его стенки, а также координат расположения захватов по трубопроводу.

Положение трубопровода в ремонтном котловане характеризуется двумя полиномами, описывающими изгиб центральной оси трубопровода в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно. Такие полиномы имеют вид (2.1):

$$y(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + ex, \quad (2.1)$$

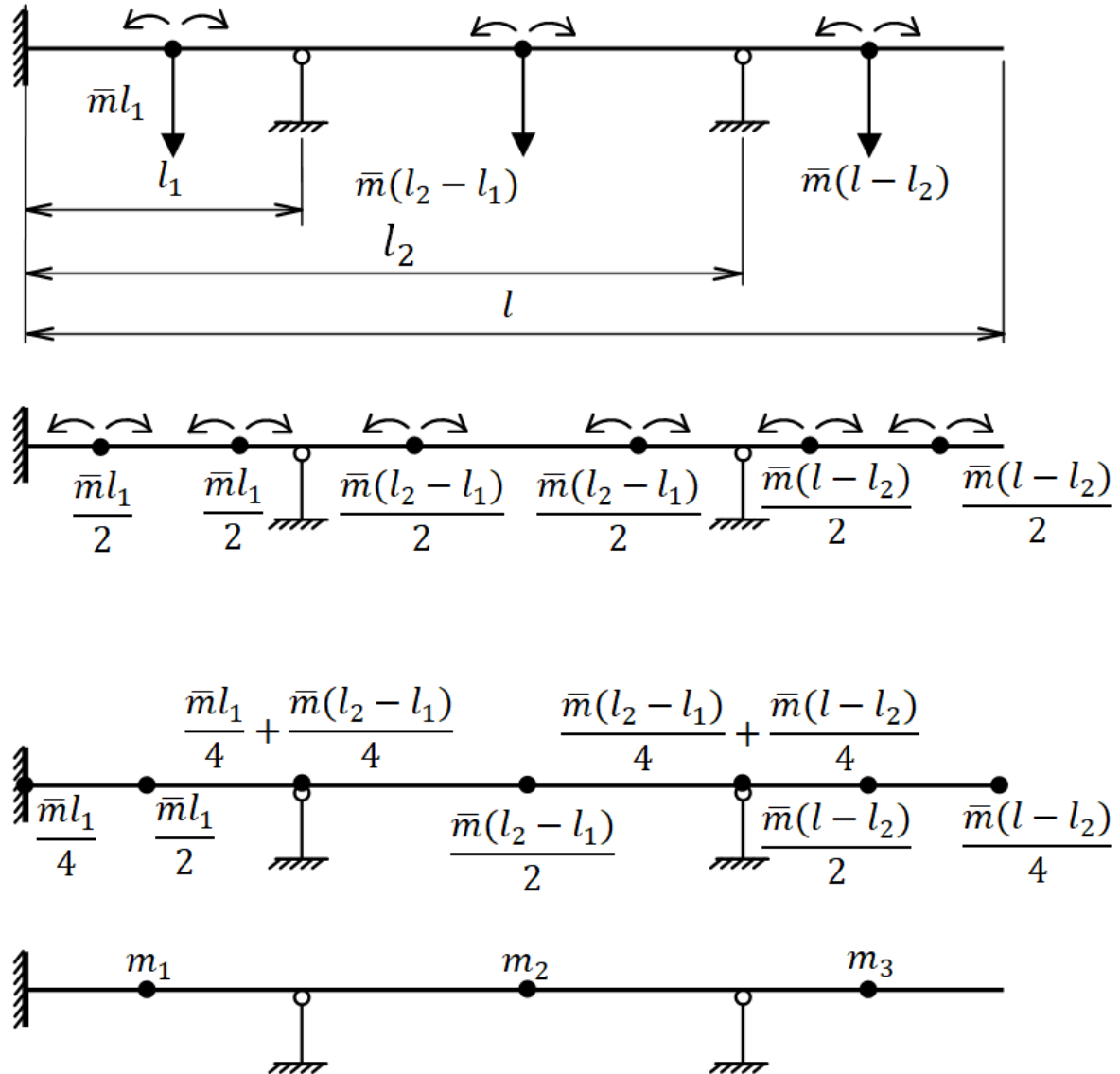
где  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $e$  – коэффициенты полинома;  $x$  – горизонтальная координата сечения трубопровода, м [30].

Поставленную задачу будем решать посредством расчета величин сил реакций, возникающих в гидроцилиндрах устройств при внезапном снятии статической нагрузки в месте разрезания трубопровода.

Масса трубопровода разбивается на три сосредоточенные массы в соответствии с рисунком 3, перемещения которых в процессе колебаний трубопровода после его разрезания будут рассматриваться в дальнейшем.

Край ремонтного котлована в расчетной схеме представим в виде жесткой заделки. Это допущение позволит упростить математическую модель, не принимая в расчет деформацию грунта у края котлована. При этом такое допущение обеспечит завышенные величины искомых усилий.

Захваты устройств фиксирования и центрирования обозначим на схеме в виде шарнирных опор, как показано на рисунке 2.6. При этом силы реакции в шарнирных опорах при смещении концов трубопровода будут численно равны искомым усилиям для их удержания от смещения.



$\bar{m}$  – вес одного погонного метра трубы, кг

Рисунок 2.6 – Определение сосредоточенных масс вдоль трубопровода

Для вычисления параметров, входящих в расчет коэффициентов податливости требуется построение единичных систем.

Первая единичная система представлена на рисунке 2.7.

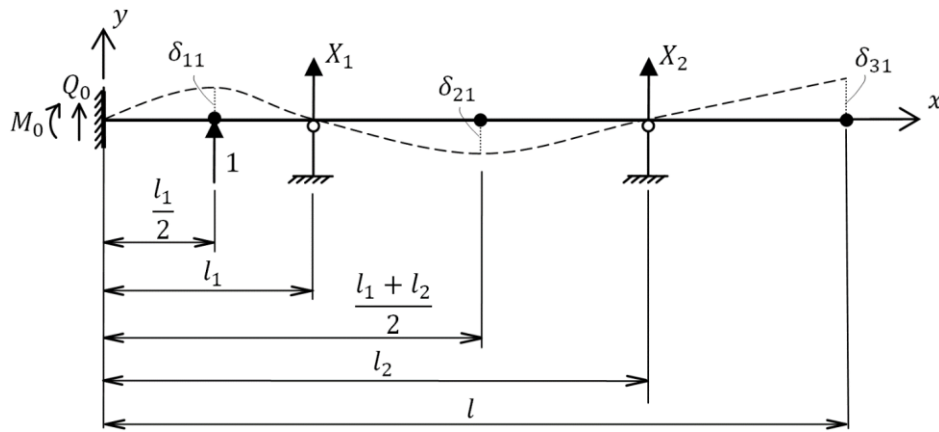


Рисунок 2.7 – Первая единичная система

$Q_0$  – поперечная сила в месте жесткой заделки трубопровода, Н;  
 $M_0$  – изгибающий момент в месте жесткой заделки трубопровода, Н·м;  
 $X_j$  – усилия, создаваемые захватами  $j$ -го устройства фиксирования и центрирования при резком смещении конца трубопровода, в момент времени  $t$ , Н;  $\delta_{ij}$  – коэффициенты податливости, Н/м;  $x$  – горизонтальная координата сечения трубопровода, м

Система уравнений действующих на трубопровод поперечных сил и изгибающих моментов, а также углов прогиба центральной оси трубопровода и величин ее прогибов для первой единичной системы запишется в виде (2.2):

$$\left\{ \begin{aligned} Q(x) &= Q_0 + 1 \cdot He\left(x - \frac{l_1}{2}\right) + X_1 \cdot He(x - l_1) + X_2 \cdot He(x - l_2) \\ M(x) &= M_0 + Q_0 x + 1 \cdot \left(x - \frac{l_1}{2}\right) \cdot He\left(x - \frac{l_1}{2}\right) + X_1 \cdot (x - l_1) \cdot He(x - l_1) + \\ &+ X_2 \cdot (x - l_2) \cdot He(x - l_2) \\ \theta(x) &= M_0 x + \frac{Q_0 x^2}{2EI} + \frac{\left(x - \frac{l_1}{2}\right)^2}{2EI} \cdot He\left(x - \frac{l_1}{2}\right) + \frac{X_1 \cdot (x - l_1)^2}{2EI} \cdot He(x - l_1) + \\ &+ \frac{X_2 \cdot (x - l_2)^2}{2EI} \cdot He(x - l_2) \\ W(x) &= \frac{M_0 x^3}{2EI} + \frac{Q_0 x^3}{6EI} + \frac{\left(x - \frac{l_1}{2}\right)^3}{6EI} \cdot He\left(x - \frac{l_1}{2}\right) + \frac{X_1 \cdot (x - l_1)^3}{6EI} \cdot He(x - l_1) + \\ &+ \frac{X_2 \cdot (x - l_2)^3}{6EI} \cdot He(x - l_2) \end{aligned} \right. \quad (2.2)$$



где  $Q(x)$  – поперечная сила, действующая на трубопровод в сечении с координатой  $x$ , Н;  $M(x)$  – изгибающий момент в сечении  $x$  трубопровода, Н·м;  $\theta(x)$  – углы прогиба центральной оси трубопровода в сечении  $x$ , рад;  $W(x)$  – прогиб трубопровода в сечении  $x$ , м;  $E$  – модуль Юнга стали трубопровода, Н;  $I$  – осевой момент инерции трубы, м<sup>4</sup>;  $He(x)$  – функция Хевисайда, равная нулю при  $x < 0$  и равная единице при  $x \geq 0$  [30].

При этом граничные условия выглядят следующим образом:

1. При  $x = l$ ,  $Q(l) = 0$
2. При  $x = l$ ,  $M(l) = 0$
3. При  $x = l_1$ ,  $W(l_1) = 0$
4. При  $x = l_2$ ,  $W(l_2) = 0$

С учетом граничных условий запишем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (2.3) для первой единичной системы:

$$\begin{cases} Q_0 + 1 + X_1 + X_2 = 0 \\ M_0 + Q_0 l + \left(l - \frac{l_1}{2}\right) + X_1 \cdot (l - l_1) + X_2 \cdot (l - l_2) = 0 \\ \frac{M_0 l_1^2}{2EI} + \frac{Q_0 l_1^3}{6EI} + \frac{\left(l_1 - \frac{l_1}{2}\right)^3}{6EI} = 0 \\ \frac{M_0 l_2^2}{2EI} + \frac{Q_0 l_2^3}{6EI} + \frac{\left(l_2 - \frac{l_1}{2}\right)^3}{6EI} + \frac{X_1 \cdot (l_2 - l_1)^3}{6EI} = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Решение полученной СЛАУ методом обратной матрицы позволяет вычислить величины сил реакций  $X_j$  с учетом представленной первой единичной системы.

Коэффициенты податливости для первой единичной системы вычисляются через выражения (2.4)-(2.6):

$$\delta_{11} = \frac{M_0 \cdot \left(\frac{l_1}{2}\right)^2}{2EI} + \frac{Q_0 \left(\frac{l_1}{2}\right)^3}{6EI} \quad (2.4)$$

$$\delta_{21} = \frac{M_0}{2EI} \left( \frac{l_1 + l_2}{2} \right)^2 + \frac{Q_0}{6EI} \left( \frac{l_1 + l_2}{2} \right)^3 + \frac{\left( \frac{l_1 + l_2}{2} - \frac{l_1}{2} \right)^3}{6EI} + \frac{X_1}{6EI} \left( \frac{l_1 + l_2}{2} - l_1 \right)^3 \quad (2.5)$$

$$\delta_{31} = \frac{M_0 l^2}{2EI} + \frac{Q_0 l^3}{6EI} + \frac{\left( l - \frac{l_1}{2} \right)^3}{6EI} + \frac{X_1}{6EI} (l - l_1)^3 + \frac{X_2}{6EI} (l - l_2)^3 \quad (2.6)$$

Вторая единичная система представлена на рисунке 2.8.

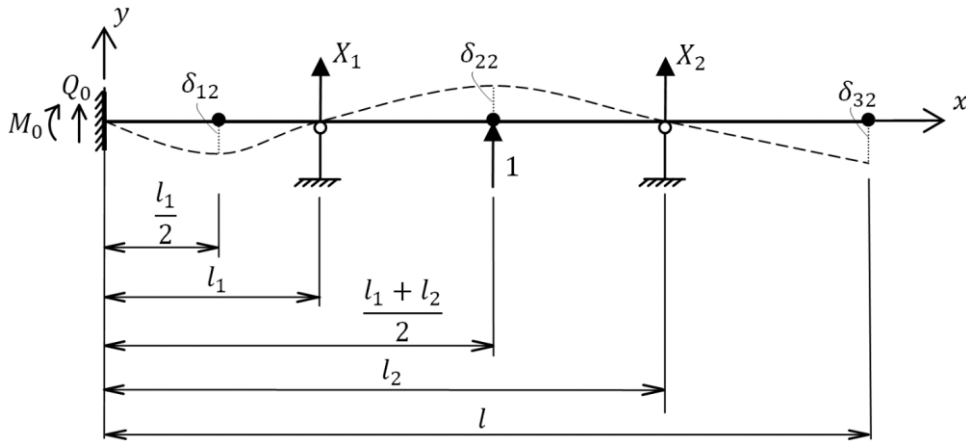


Рисунок 2.8 – Вторая единичная система

Система уравнений действующих на трубопровод поперечных сил и изгибающих моментов, а также углов прогиба центральной оси трубопровода и величин ее прогибов для второй единичной системы запишется в виде (2.7):

$$\left\{ \begin{aligned} Q(x) &= Q_0 + 1 \cdot He\left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right) + X_1 \cdot He(x - l_1) + X_2 \cdot He(x - l_2) \\ M(x) &= M_0 + Q_0 x + 1 \cdot \left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right) \cdot He\left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right) + \\ &+ X_1 \cdot (x - l_1) \cdot He(x - l_1) + X_2 \cdot (x - l_2) \cdot He(x - l_2) \\ \theta(x) &= M_0 x + \frac{Q_0 x^2}{2EI} + \frac{\left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right)^2}{2EI} \cdot He\left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right) + \\ &+ \frac{X_1 \cdot (x - l_1)^2}{2EI} \cdot He(x - l_1) + \frac{X_2 \cdot (x - l_2)^2}{2EI} \cdot He(x - l_2) \\ W(x) &= \frac{M_0 x^2}{2EI} + \frac{Q_0 x^3}{6EI} + \frac{\left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right)^3}{6EI} \cdot He\left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right) + \\ &+ \frac{X_1 \cdot (x - l_1)^3}{6EI} \cdot He(x - l_1) + \frac{X_2 \cdot (x - l_2)^3}{6EI} \cdot He(x - l_2) \end{aligned} \right. \quad (2.7)$$

При этом граничные условия выглядят следующим образом:

1. При  $x = l$ ,  $Q(l) = 0$
2. При  $x = l$ ,  $M(l) = 0$
3. При  $x = l_1$ ,  $W(l_1) = 0$
4. При  $x = l_2$ ,  $W(l_2) = 0$

С учетом граничных условий запишем систему уравнений (2.8) для второй единичной системы:

$$\begin{cases} Q_0 + 1 + X_1 + X_2 = 0 \\ M_0 + Q_0 l + \left( l - \frac{l_1 + l_2}{2} \right) + X_1 \cdot (l - l_1) + X_2 \cdot (l - l_2) = 0 \\ \frac{M_0 l_1^2}{2EI} + \frac{Q_0 l_1^3}{6EI} = 0 \\ \frac{M_0 l_2^2}{2EI} + \frac{Q_0 l_2^3}{6EI} + \frac{\left( l_2 - \frac{l_1 + l_2}{2} \right)^3}{6EI} + \frac{X_1 \cdot (l_2 - l_1)^3}{6EI} = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

Коэффициенты податливости для второй единичной системы вычисляются через выражения (2.9)-(2.11):

$$\delta_{12} = \frac{M_0 \cdot \left( \frac{l_1}{2} \right)^2}{2EI} + \frac{Q_0 \left( \frac{l_1}{2} \right)^3}{6EI} \quad (2.9)$$

$$\delta_{22} = \frac{M_0 \left( \frac{l_1 + l_2}{2} \right)^2}{2EI} + \frac{Q_0 \left( \frac{l_1 + l_2}{2} \right)^3}{6EI} + \frac{X_1 \left( \frac{l_1 + l_2}{2} - l_1 \right)^3}{6EI} \quad (2.10)$$

$$\delta_{32} = \frac{M_0 l^2}{2EI} + \frac{Q_0 l^3}{6EI} + \frac{\left( l - \frac{l_1 + l_2}{2} \right)^3}{6EI} + \frac{X_1 (l - l_1)^3}{6EI} + \frac{X_2 (l - l_2)^3}{6EI} \quad (2.11)$$

Третья единичная система представлена на рисунке 2.9.

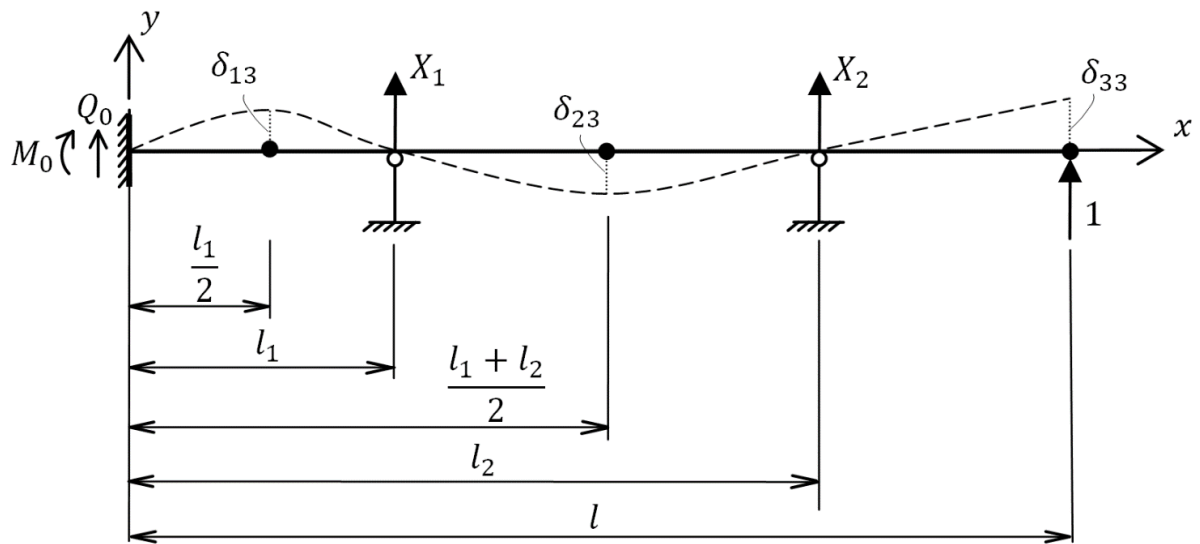


Рисунок 2.9 – Третья единичная система

Системы уравнений действующих на трубопровод поперечных сил и изгибающих моментов, а также углов прогиба центральной оси трубопровода и величин ее прогибов для третьей единичной системы запишется в виде (2.12):

$$\left\{ \begin{array}{l} Q(x) = Q_0 + X_1 \cdot He(x-l_1) + X_2 \cdot He(x-l_2) \\ M(x) = M_0 + Q_0 x + X_1 \cdot (x-l_1) \cdot He(x-l_1) + X_2 \cdot (x-l_2) \cdot He(x-l_2) \\ \theta(x) = M_0 x + \frac{Q_0 x^2}{2EI} + \frac{X_1 \cdot (x-l_1)^2}{2EI} \cdot He(x-l_1) + \frac{X_2 \cdot (x-l_2)^2}{2EI} \cdot He(x-l_2) \\ W(x) = \frac{M_0 x^2}{2EI} + \frac{Q_0 x^3}{6EI} + \frac{X_1 \cdot (x-l_1)^3}{6EI} \cdot He(x-l_1) + \frac{X_2 \cdot (x-l_2)^3}{6EI} \cdot He(x-l_2) \end{array} \right. \quad (2.12)$$

При этом граничные условия выглядят следующим образом:

1. При  $x = l$ ,  $Q(l) = -1$
2. При  $x = l$ ,  $M(l) = 0$
3. При  $x = l_1$ ,  $W(l_1) = 0$
4. При  $x = l_2$ ,  $W(l_2) = 0$

С учетом граничных условий СЛАУ для третьей единичной системы записывается в виде (2.13):

$$\begin{cases} Q_0 + 1 + X_1 + X_2 = 0 \\ M_0 + Q_0 l + X_1 \cdot (l - l_1) + X_2 \cdot (l - l_2) = 0 \\ \frac{M_0 l_1^2}{2EI} + \frac{Q_0 l_1^3}{6EI} = 0 \\ \frac{M_0 l_2^2}{2EI} + \frac{Q_0 l_2^3}{6EI} + \frac{X_1 \cdot (l_2 - l_1)^3}{6EI} = 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

Коэффициенты податливости для третьей единичной системы вычисляются через выражения (2.14)-(2.16):

$$\delta_{13} = \frac{M_0 \cdot \left(\frac{l_1}{2}\right)^2}{2EI} + \frac{Q_0 \left(\frac{l_1}{2}\right)^3}{6EI} \quad (2.14)$$

$$\delta_{23} = \frac{M_0 \left(\frac{l_1 + l_2}{2}\right)^2}{2EI} + \frac{Q_0 \left(\frac{l_1 + l_2}{2}\right)^3}{6EI} + \frac{X_1 \left(\frac{l_1 + l_2}{2} - l_1\right)^3}{6EI} \quad (2.15)$$

$$\delta_{33} = \frac{M_0 l^2}{2EI} + \frac{Q_0 l^3}{6EI} + \frac{X_1 (l - l_1)^3}{6EI} + \frac{X_2 (l - l_2)^3}{6EI} \quad (2.16)$$

Система уравнений перемещения масс (2.17) запишется в следующем виде:

$$\begin{cases} y_1(t) = \delta_{11} Y_1(t) + \delta_{12} Y_2(t) + \delta_{13} Y_3(t) \\ y_2(t) = \delta_{21} Y_1(t) + \delta_{22} Y_2(t) + \delta_{23} Y_3(t) \\ y_3(t) = \delta_{31} Y_1(t) + \delta_{32} Y_2(t) + \delta_{33} Y_3(t) \end{cases} \quad (2.17)$$

где  $t$  – момент времени в процессе колебаний трубопровода после резкого смещения его концов в результате разрезания, с;  $y_i(t)$  – перемещение  $i$ -й сосредоточенной массы, м;  $Y_i(t)$  – сила инерции, действующая на  $i$ -ю сосредоточенную массу, Н.

Расчетная схема при действии на трубопровод сил инерции в процессе его колебаний в результате резкого смещения после разрезания представлена на рисунке 2.10.

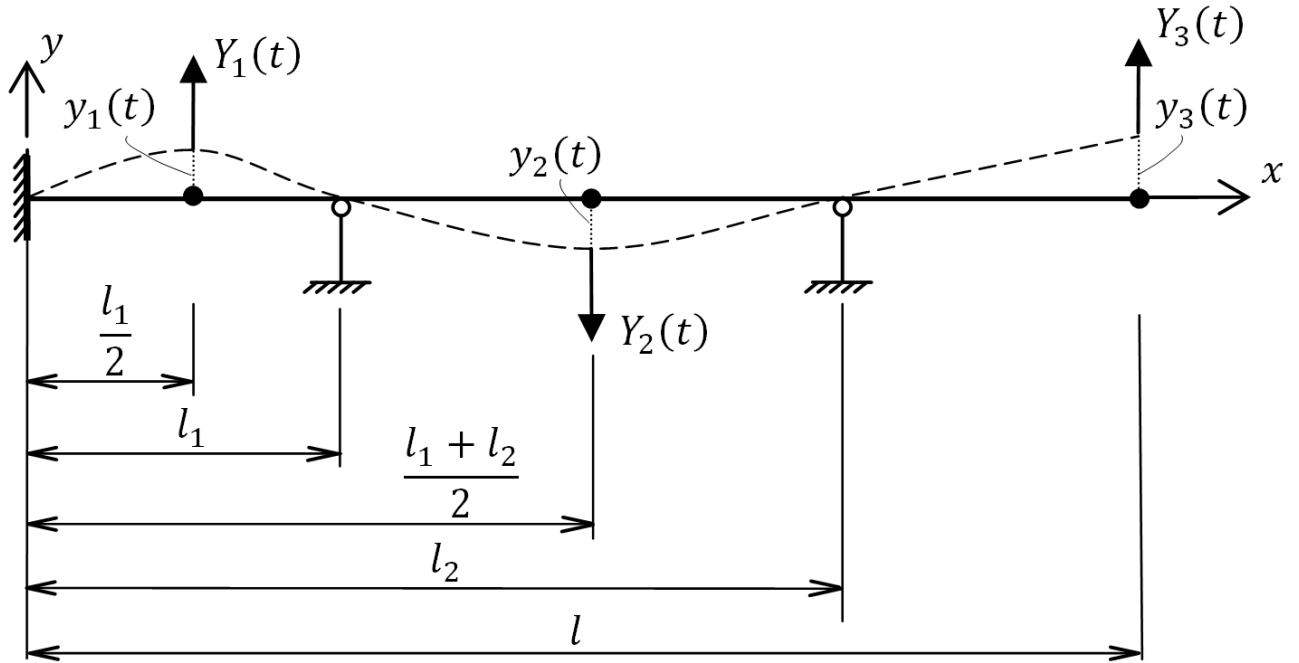


Рисунок 2.10 – Расчетная схема резкого смещения

Силы инерции по второму закону Ньютона вычисляются путем решения системы уравнений (2.18):

$$\begin{cases} Y_1(t) = -m_1 \ddot{y}_1(t) \\ Y_2(t) = -m_2 \ddot{y}_2(t) \\ Y_3(t) = -m_3 \ddot{y}_3(t) \end{cases} \quad (2.18)$$

Подставим выражения (2.18) в (2.17), в результате получим следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнения 2-го порядка (2.19):

$$\begin{cases} y_1(t) = -\delta_{11} m_1 \ddot{y}_1(t) - \delta_{12} m_2 \ddot{y}_2(t) - \delta_{13} m_3 \ddot{y}_3(t) \\ y_2(t) = -\delta_{21} m_1 \ddot{y}_1(t) - \delta_{22} m_2 \ddot{y}_2(t) - \delta_{23} m_3 \ddot{y}_3(t) \\ y_3(t) = -\delta_{31} m_1 \ddot{y}_1(t) - \delta_{32} m_2 \ddot{y}_2(t) - \delta_{33} m_3 \ddot{y}_3(t) \end{cases} \quad (2.19)$$

Решением данных дифференциальных уравнений (2.19) является (2.20) [61]:

$$y_i(t) = \sum_{k=1}^3 y_{ik}(t) = \sum_{k=1}^3 Y_{ik} \sin(\omega_k t + \varphi_k) \quad (2.20)$$

где  $k$  – порядковый номер формы колебаний равный количеству участвующих в расчете сосредоточенных масс вдоль трубопровода;  $y_{ik}(t)$  – перемещения  $i$ -й сосредоточенной массы в момент времени  $t$  для  $k$ -й формы

колебаний, м;  $Y_{ik}$  – амплитудное значение силы инерции, действующей на  $i$ -ую сосредоточенную массу в момент времени  $t$  для  $k$ -й формы колебаний, Н;  $w_k(t)$  – частота собственных колебаний трубопровода для  $k$ -й формы колебаний в момент времени  $t$ , Гц;  $\varphi_k(t)$  – фаза колебаний трубопровода для  $k$ -й формы колебаний в момент времени  $t$ , рад.

Тогда для  $k$ -й формы колебаний справедлива система (2.21):

$$\begin{cases} y_1(t) = Y_{1k} \sin(w_k t + \varphi_k) \\ y_2(t) = Y_{2k} \sin(w_k t + \varphi_k) \\ y_3(t) = Y_{3k} \sin(w_k t + \varphi_k) \end{cases} \quad (2.21)$$

Найдем вторые производные (2.21), получим систему (2.22):

$$\begin{cases} \ddot{y}_1(t) = -Y_{1k} w_k^2 \sin(w_k t + \varphi_k) \\ \ddot{y}_2(t) = -Y_{2k} w_k^2 \sin(w_k t + \varphi_k) \\ \ddot{y}_3(t) = -Y_{3k} w_k^2 \sin(w_k t + \varphi_k) \end{cases} \quad (2.22)$$

Подставим (2.21) и (2.22) в (2.20). Сократив на  $\sin(w_k t + \varphi_k)$  получим систему (2.23):

$$\begin{cases} Y_{1k} = \delta_{11} m_1 Y_{1k} w_k^2 + \delta_{12} m_2 Y_{2k} w_k^2 + \delta_{13} m_3 Y_{3k} w_k^2 \\ Y_{2k} = \delta_{21} m_1 Y_{1k} w_k^2 + \delta_{22} m_2 Y_{2k} w_k^2 + \delta_{23} m_3 Y_{3k} w_k^2 \\ Y_{3k} = \delta_{31} m_1 Y_{1k} w_k^2 + \delta_{32} m_2 Y_{2k} w_k^2 + \delta_{33} m_3 Y_{3k} w_k^2 \end{cases} \quad (2.23)$$

Преобразовав (2.23), в результате получим систему амплитудно-частотных уравнений (2.24):

$$\begin{cases} \left( \delta_{11} m_1 - \frac{1}{w_k^2} \right) Y_{1k} + \delta_{12} m_2 Y_{2k} + \delta_{13} m_3 Y_{3k} = 0 \\ \delta_{21} m_1 Y_{1k} + \left( \delta_{22} m_2 - \frac{1}{w_k^2} \right) Y_{2k} + \delta_{23} m_3 Y_{3k} = 0 \\ \delta_{31} m_1 Y_{1k} + \delta_{32} m_2 Y_{2k} + \left( \delta_{33} m_3 - \frac{1}{w_k^2} \right) Y_{3k} = 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

Данная система имеет отличные от нуля корни  $Y_{ik}$  в случае, если определитель матрицы системы равен нулю. В этом случае должно выполняться равенство (2.25) [61]:

$$\det A = \begin{vmatrix} \delta_{11}m_1 - \frac{1}{w_k^2} & \delta_{12}m_2 & \delta_{13}m_3 \\ \delta_{21}m_1 & \delta_{22}m_2 - \frac{1}{w_k^2} & \delta_{23}m_3 \\ \delta_{31}m_1 & \delta_{32}m_2 & \delta_{33}m_3 - \frac{1}{w_k^2} \end{vmatrix} = 0 \quad (2.26)$$

Выражение (2.25) представляет собой так называемое «вековое уравнение», служащее для определения величин частот собственных колебаний [61]. Его решение заключается в замене 2.27:

$$\frac{1}{w_k^2} = \lambda_k \quad (2.27)$$

где  $\lambda_k$  – характеристические (собственные) числа матрицы.

Далее, изменяя значение собственных чисел матрицы, находим те их значения, при которых определитель  $\det A$  равен нулю. При данных собственных числах вычисляем частоты собственных колебаний трубопровода после его резкого смещения в результате разрезания.

Тогда собственные числа, исходя из (2.27), вычисляются из выражения (2.28):

$$w_k = \frac{1}{\sqrt{\lambda_k}} \quad (2.28)$$

Следующим шагом для определения амплитудных величин  $Y_{ik}$  перемещений сосредоточенных масс является замена в системе (2.24) в виде (2.29):

$$y_{1k} = \frac{Y_{1k}}{Y_{1k}} = 1; \quad y_{2k} = \frac{Y_{2k}}{Y_{1k}}; \quad y_{3k} = \frac{Y_{3k}}{Y_{1k}} \quad (2.29)$$

Тогда получим неоднородную СЛАУ (2.30), при решении которой находим величины  $y_{ik}$ :



$$\begin{cases} \delta_{12}m_2y_{2k} + \delta_{13}m_3y_{3k} = -\left(\delta_{11}m_1 - \frac{1}{w_k^2}\right) \\ \left(\delta_{22}m_2 - \frac{1}{w_k^2}\right)y_{2k} + \delta_{23}m_3y_{3k} = -\delta_{21}m_1 \\ \delta_{32}m_2y_{2k} + \left(\delta_{33}m_3 - \frac{1}{w_k^2}\right)y_{3k} = -\delta_{31}m_1 \end{cases} \quad (2.30)$$

Схема перемещений трубопровода в процессе его колебаний приведена на рисунке 2.11.

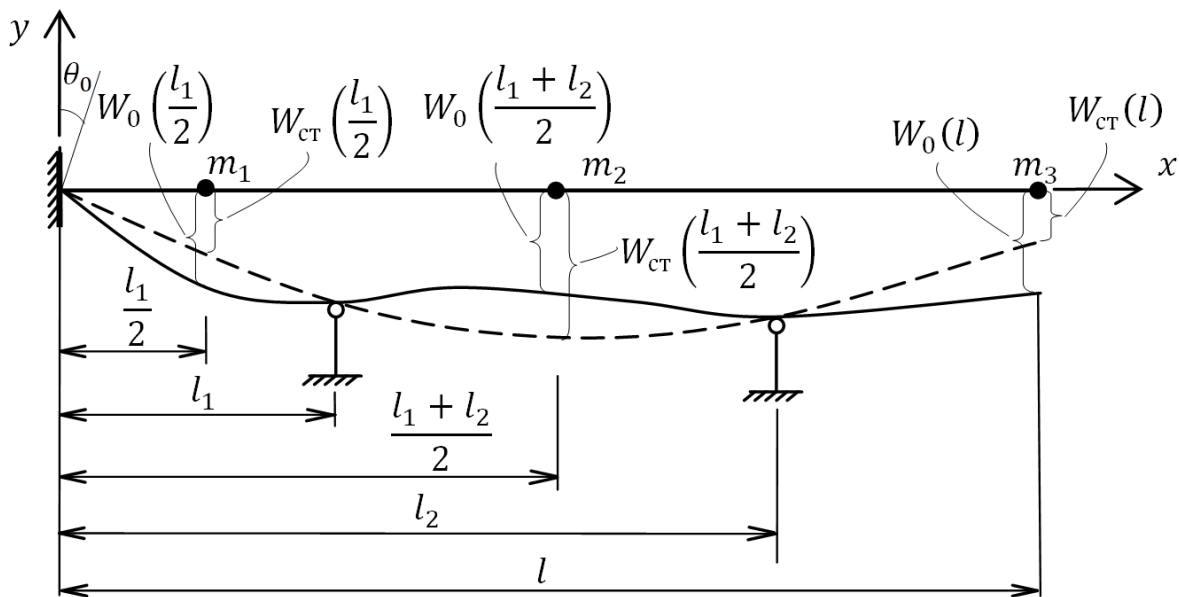


Рисунок 2.11 – Схема перемещений трубопровода в процессе его колебаний

$W_0(x)$ ,  $W_{cm}(x)$  – прогибы участка трубопровода в начале и в конце процесса колебаний его конца, соответственно

Исходя из схемы на рисунке 2.11, начальные перемещения (отклонения) масс от первоначального положения рассчитываются по формулам (2.31):

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= W_0\left(\frac{l_1}{2}\right) - W_{cm}\left(\frac{l_1}{2}\right); \\ \varepsilon_2 &= W_0\left(\frac{l_1+l_2}{2}\right) - W_{cm}\left(\frac{l_1+l_2}{2}\right); \\ \varepsilon_3 &= W_0(l) - W_{cm}(l) \end{aligned} \quad (2.31)$$

Далее запишем уравнения перемещения масс (2.32), исходя из (2.20), с учетом (2.31):

$$\begin{cases} y_1(t) = Y_{11} \sin(w_1 t + \varphi_1) + Y_{12} \sin(w_2 t + \varphi_2) + Y_{13} \sin(w_3 t + \varphi_3) \\ y_2(t) = y_{21} Y_{11} \sin(w_1 t + \varphi_1) + y_{22} Y_{12} \sin(w_2 t + \varphi_2) + y_{23} Y_{13} \sin(w_3 t + \varphi_3) \\ y_3(t) = y_{31} Y_{11} \sin(w_1 t + \varphi_1) + y_{32} Y_{12} \sin(w_2 t + \varphi_2) + y_{33} Y_{13} \sin(w_3 t + \varphi_3) \end{cases} \quad (2.32)$$

Тогда уравнения скорости масс вычисляются путем решения системы (2.33):

$$\begin{cases} \dot{y}_1(t) = Y_{11} w_1 \cos(w_1 t + \varphi_1) + Y_{12} w_2 \cos(w_2 t + \varphi_2) + Y_{13} w_3 \cos(w_3 t + \varphi_3) \\ \dot{y}_2(t) = y_{21} Y_{11} w_1 \cos(w_1 t + \varphi_1) + y_{22} Y_{12} w_2 \cos(w_2 t + \varphi_2) + y_{23} Y_{13} w_3 \cos(w_3 t + \varphi_3) \\ \dot{y}_3(t) = y_{31} Y_{11} w_1 \cos(w_1 t + \varphi_1) + y_{32} Y_{12} w_2 \cos(w_2 t + \varphi_2) + y_{33} Y_{13} w_3 \cos(w_3 t + \varphi_3) \end{cases} \quad (2.33)$$

При этом начальные условия для принятой схемы колебаний трубопровода запишутся в виде (2.34):

$$y_1(0) = \varepsilon_1; y_2(0) = \varepsilon_2; y_3(0) = \varepsilon_3; \dot{y}_1(0) = 0; \dot{y}_2(0) = 0; \dot{y}_3(0) = 0 \quad (2.34)$$

Подставив начальные условия (2.34) в (2.32) и (2.33), получим:

$$\begin{cases} Y_{11} \sin \varphi_1 + Y_{12} \sin \varphi_2 + Y_{13} \sin \varphi_3 = \varepsilon_1 \\ y_{21} Y_{11} \sin \varphi_1 + y_{22} Y_{12} \sin \varphi_2 + y_{23} Y_{13} \sin \varphi_3 = \varepsilon_2 \\ y_{31} Y_{11} \sin \varphi_1 + y_{32} Y_{12} \sin \varphi_2 + y_{33} Y_{13} \sin \varphi_3 = \varepsilon_3 \\ Y_{11} w_1 \cos \varphi_1 + Y_{12} w_2 \cos \varphi_2 + Y_{13} w_3 \cos \varphi_3 = 0 \\ y_{21} Y_{11} w_1 \cos \varphi_1 + y_{22} Y_{12} w_2 \cos \varphi_2 + y_{23} Y_{13} w_3 \cos \varphi_3 = 0 \\ y_{31} Y_{11} w_1 \cos \varphi_1 + y_{32} Y_{12} w_2 \cos \varphi_2 + y_{33} Y_{13} w_3 \cos \varphi_3 = 0 \end{cases} \quad (2.35)$$

Решая систему уравнений (2.35), определяются значения неизвестных  $Y_{ik}$  и  $\varphi_{ik}$ . Решение возможно путем замен (2.36):

$$\begin{aligned} A &= Y_{11} \cos \varphi_1; B = Y_{11} \sin \varphi_1; \\ C &= Y_{12} \cos \varphi_2; D = Y_{12} \sin \varphi_2; \\ E &= Y_{13} \cos \varphi_3; F = Y_{13} \sin \varphi_3 \end{aligned} \quad (2.36)$$

Откуда следует (2.37):

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \sqrt{A^2 + B^2}; Y_{12} = \sqrt{C^2 + D^2}; Y_{13} = \sqrt{E^2 + F^2}; \\ \varphi_1 &= \arctg \frac{B}{A}; \varphi_2 = \arctg \frac{D}{C}; \varphi_3 = \arctg \frac{F}{E} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Тогда с учетом (2.36) система (2.37) запишется в виде (2.38)

$$\begin{cases} B + D + F = \varepsilon_1 \\ y_{21}B + y_{22}D + y_{23}F = \varepsilon_2 \\ y_{31}B + y_{32}D + y_{33}F = \varepsilon_3 \\ Aw_1 + Cw_2 + Ew_3 = 0 \\ y_{21}Aw_1 + y_{22}Cw_2 + y_{23}Ew_3 = 0 \\ y_{31}Aw_1 + y_{32}Cw_2 + y_{33}Ew_3 = 0 \end{cases} \quad (2.38)$$

После этого решается (2.38) с учетом произведенных замен.

Далее исходя из (2.18), продифференцировав (2.33), зависимости для сил инерции, действующих на сосредоточенные массы, имеют вид (2.39)

$$\begin{cases} Y_1(t) = m_1 (Y_{11}w_1^2 \sin(w_1t + \varphi_1) + Y_{12}w_2^2 \sin(w_2t + \varphi_2) + Y_{13}w_3^2 \sin(w_3t + \varphi_3)) \\ Y_2(t) = m_2 (y_{21}Y_{11}w_1^2 \sin(w_1t + \varphi_1) + y_{22}Y_{12}w_2^2 \sin(w_2t + \varphi_2) + \\ + y_{23}Y_{13}w_3^2 \sin(w_3t + \varphi_3)) \\ Y_3(t) = m_3 (y_{31}Y_{11}w_1^2 \sin(w_1t + \varphi_1) + y_{32}Y_{12}w_2^2 \sin(w_2t + \varphi_2) + \\ + y_{33}Y_{13}w_3^2 \sin(w_3t + \varphi_3)) \end{cases} \quad (2.39)$$

Для определения сил реакций, возникающих в захватах устройств в процессе колебаний концов трубопровода в результате его смещения после разрезания, воспользуемся следующей расчетной схемой, приведенной на рисунке 2.12.

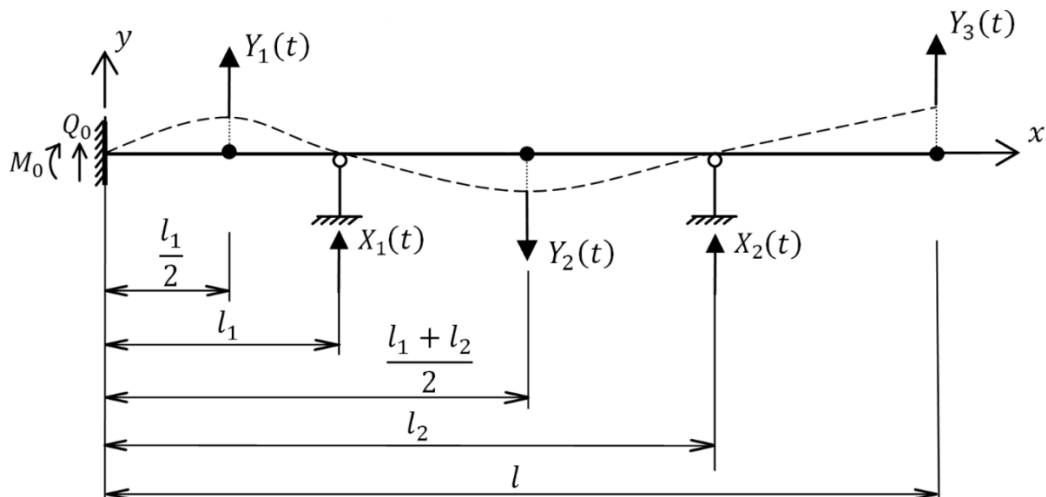


Рисунок 2.12 – Расчетная схема для определения сил реакций, возникающих в захвате устройств в процессе колебаний концов трубопровода

С учетом приведенной расчетной схемы система уравнений для действующих на трубопровод в процессе его колебаний поперечных сил  $Q(t)$ , изгибающих моментов  $M(t)$ , углов поворота центральной оси трубопровода  $\theta(t)$  и прогибов  $w(t)$  имеет вид (2.40) [30]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 Q(x) = Q_0(t) + Y_1(t) \cdot He\left(x - \frac{l_1}{2}\right) + X_1(t) \cdot He(x - l_1) + Y_2(t) \cdot He\left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right) + \\
 + X_2(t) \cdot He(x - l_2) \\
 M(x) = M_0(t) + Q_0(t)x + Y_1(t) \cdot \left(x - \frac{l_1}{2}\right) \cdot He\left(x - \frac{l_1}{2}\right) + \\
 + X_1(t) \cdot (x - l_1) \cdot He(x - l_1) + Y_2(t) \cdot \left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right) \cdot He\left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right) + \\
 + X_2(t) \cdot (x - l_2) \cdot He(x - l_2) \\
 \theta(x) = \frac{M_0(t)x}{EI} + \frac{Q_0(t)x^2}{2EI} + Y_1(t) \frac{\left(x - \frac{l_1}{2}\right)^2}{2EI} \cdot He\left(x - \frac{l_1}{2}\right) + \\
 + \frac{X_1(t) \cdot (x - l_1)^2}{2EI} \cdot He(x - l_1) + Y_2(t) \frac{\left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right)^2}{2EI} \cdot He\left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right) + \\
 + \frac{X_2(t) \cdot (x - l_2)^2}{2EI} \cdot He(x - l_2) \\
 W(x) = \frac{M_0(t)x^2}{2EI} + \frac{Q_0(t)x^3}{6EI} + Y_1(t) \frac{\left(x - \frac{l_1}{2}\right)^3}{6EI} \cdot He\left(x - \frac{l_1}{2}\right) + \\
 + \frac{X_1(t) \cdot (x - l_1)^3}{6EI} \cdot He(x - l_1) + Y_2(t) \frac{\left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right)^3}{6EI} \cdot He\left(x - \frac{l_1 + l_2}{2}\right) + \\
 + \frac{X_2(t) \cdot (x - l_2)^3}{6EI} \cdot He(x - l_2)
 \end{array} \right. \quad (2.40)$$

Исходя из принятой расчетной схемы, граничные условия имеют вид

$$\text{При } x = l \quad Q(t) = -Y_3(t)$$

$$\text{При } x = l \quad M(t) = 0$$

$$\text{При } x = l_1 \quad w(l_1) = 0$$

$$\text{При } x = l_2 \quad w(l_2) = 0$$

Для определения усилий, необходимых для устранения резкого смещения концов трубопровода, получена СЛАУ (2.41):

$$\begin{cases} Q_0(t) + Y_1(t) + X_1(t) + Y_2(t) + X_2(t) = -Y_3(t) \\ M_0(t) + Q_0(t)l + Y_1(t) \cdot \left(l - \frac{l_1}{2}\right) + X_1(t) \cdot (l - l_1) + Y_2(t) \cdot \left(l - \frac{l_1 + l_2}{2}\right) + X_2(t) \cdot (l - l_2) = 0 \\ \frac{M_0(t)l_1^2}{2EI} + \frac{Q_0(t)l_1^3}{6EI} + Y_1(t) \frac{\left(l_1 - \frac{l_1}{2}\right)^3}{6EI} = 0 \\ \frac{M_0(t)l_2^2}{2EI} + \frac{Q_0(t)l_2^3}{6EI} + Y_1(t) \frac{\left(l_2 - \frac{l_1}{2}\right)^3}{6EI} + \frac{X_1(t) \cdot (l_2 - l_1)^3}{6EI} + Y_2(t) \frac{\left(l_2 - \frac{l_1 + l_2}{2}\right)^3}{6EI} = 0 \end{cases} \quad (2.41)$$

Решая полученную СЛАУ (2.41), изменяя величину  $t$ , определяются максимальные за период колебаний трубопровода величины  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$ .

Тогда полные величины усилий рассчитываются из выражений (2.42):

$$\begin{aligned} X_{1n}(t) &= X_1(t) + X_1^{cm} \\ X_{2n}(t) &= X_2(t) + X_2^{cm} \end{aligned} \quad (2.42)$$

где  $X_1^{cm}$ ,  $X_2^{cm}$  – величины сил реакций в захватах устройств, возникающие в них после окончания процесса колебаний трубопровода, когда он находится в статическом положении под действием только распределенной нагрузки от собственного веса,  $H$ .

В случае изгиба трубопровода одновременно в вертикальной и горизонтальной плоскостях полные величины усилий вычисляются по формуле (2.43):

$$X_{jn}(t) = \sqrt{X_{jnv}^2(t) + X_{jnh}^2(t)} \quad (2.43)$$

где  $X_{jnv}(t)$ ,  $X_{jnh}(t)$  – вертикальная и горизонтальная составляющие вектора усилий со стороны захвата  $j$ -го устройства на трубопровод для устранения резкого смещения его концов,  $H$  [30].

### 2.3.2 Статический расчет сил реакций в захватах устройств фиксации и центрирования в конце процесса колебаний концов трубопровода

Целью расчета является оценка величин сил реакций  $X_1^{cm}$ ,  $X_2^{cm}$ , возникающих в захватах устройств после окончания процесса колебаний концов трубопровода при их смещении, когда он находится в статическом положении под действием только распределенной нагрузки от собственного веса [142].

Распределенная нагрузка от собственного веса трубопровода рассчитывается по формуле (2.44) (Н/м):

$$q = \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot l \cdot (D^2 - d^2)}{4}, \quad (2.44)$$

где  $\rho$  – плотность материала стенки трубопровода, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $l$  – единичная длина трубопровода, м;  $D$ ,  $d$  – наружный и внутренний диаметры трубопровода соответственно, м [30].

Начальные прогибы в местах расположения захватов устройств фиксации и центрирования до разрезания трубопровода вычисляются по формулам (2.45):

$$\Delta_1 = y(l_1); \quad \Delta_2 = y(l_2) \quad (2.45)$$

где  $l_i$  – координаты длины трубопровода, в которых установлены захваты устройств фиксации и центрирования концов трубопровода, м;  $y(l_i)$  – прогиб трубопровода в сечении с координатой  $l_i$ , м

Расчет величин сил реакций  $X_i^{cm}$  в захватах устройств, возникающих в них после окончания процесса колебаний трубопровода, когда он находится в статическом положении под действием только распределенной нагрузки от собственного веса, осуществляется путем решения системы уравнений (2.46) для каждого из концов трубопровода:

$$\begin{cases} \delta_{c11} X_1^{cm} + \delta_{c12} X_2^{cm} + \Delta_{1c} + \Delta_{1P} = y(l_1) \\ \delta_{c21} X_1^{cm} + \delta_{c22} X_2^{cm} + \Delta_{2c} + \Delta_{2P} = y(l_2) \end{cases} \quad (2.46)$$

где  $\delta_{cij}$  – коэффициенты канонических уравнений метода сил, характеризующие перемещение  $i$ -го сечения с координатой  $l_i$  в результате действия  $j$ -й силы, равной единице, м/Н;  $\Delta_{ic}$  – кинематические члены, обусловленные угловым смещением в заделке;  $\Delta_{ip}$  – грузовые члены, обусловленные прогибом трубопровода в сечении с координатой  $l_i$  в результате действия распределенной нагрузки от собственного веса, м [142].

Необходимые для определения сил реакций  $X_1^{cm}$ ,  $X_2^{cm}$  эпюры изгибающих моментов представлены на рисунке 2.13.

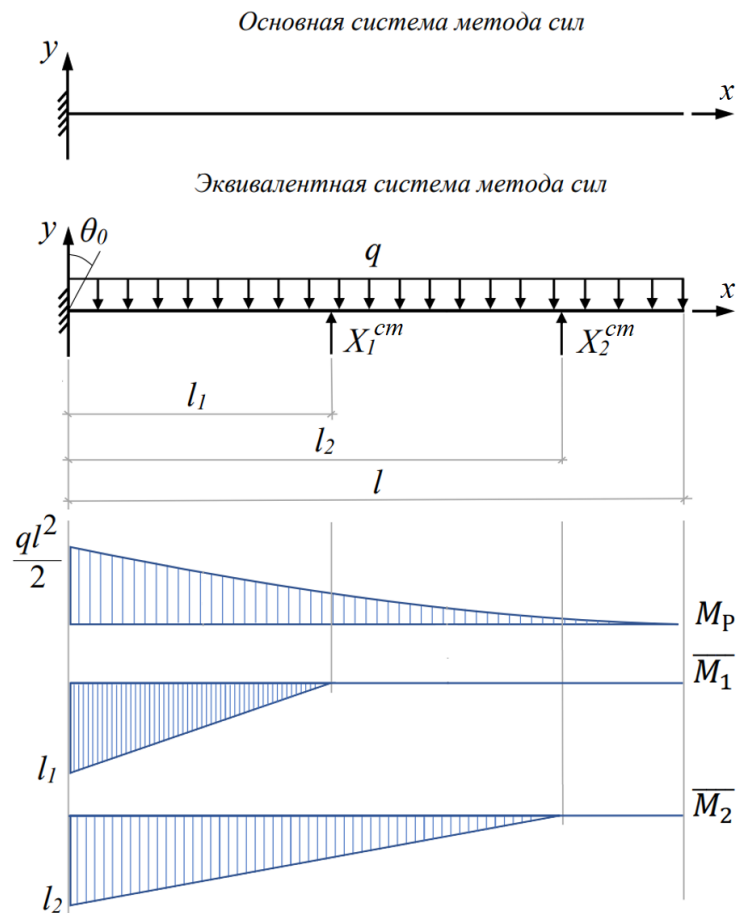


Рисунок 2.13 – Расчетная схема трубопровода при его удержании после колебаний захватами устройств фиксирования и центрирования  
 $M_p$  – изгибающий момент от действия распределенной нагрузки от собственного веса трубопровода, Н·м;  $\overline{M}_i$  – единичный изгибающий момент от действия  $i$ -й силы, равной 1 Н, Н·м

Для вычисления коэффициентов  $\delta_{cij}$  необходимо построить единичные эпюры изгибающих моментов  $\bar{M}_i$  от действия каждой неизвестной силы  $X_i = 1$  Н. Так же строится грузовая эпюра  $M_p$  от действия распределенной нагрузки от собственного веса трубопровода. Коэффициент  $\delta_{cij}$  вычисляется путем перемножения эпюры  $\bar{M}_i$  на эпюру  $\bar{M}_j$ , а грузовое перемещение  $\Delta_{ip}$  рассчитывается перемножением эпюры  $\bar{M}_i$  на эпюру  $M_p$ .

Исходя из вышесказанного, коэффициенты канонических уравнений вычисляются по формуле (2.47):

$$\delta_{cij} = \sum_{i=1}^n \int_0^{l_i} \frac{\bar{M}_i \bar{M}_j}{EI} dz, \quad (2.47)$$

где  $n$  – количество сечений, в которых установлены захваты устройств;  $\bar{M}_i, \bar{M}_j$  – изгибающие моменты от действия единичных сил по направлению действия  $i$  и  $j$  соответственно, Н·м.

В результате интегрирования формулы расчета коэффициентов канонических уравнений примут вид (2.48), (2.49):

$$\delta_{cii} = \frac{l_i^3}{3EI} \quad (2.48)$$

$$\delta_{cij} = \frac{l_i^2 \left( l_j - \frac{1}{3} l_i \right)}{2EI} \quad (2.49)$$

Осевой момент инерции трубы рассчитывается по формуле (2.50):

$$I = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} \quad (2.50)$$

Кинематические члены, обусловленные угловым смещением в заделке, вычисляются по формуле (2.51):

$$\Delta_{ic} = -\sum_{k=1}^n R_{ik} c_k = -\theta_0 l_i \quad (2.51)$$

где  $R_{ik}$  – реакция в смещаемой заделке от действия единичной силы в основной системе;  $c_k$  – заданные смещения в заделке, м [30].



Грузовые члены для случая поставленной задачи вычисляются по формуле (2.52):

$$\Delta_{ip} = -\frac{ql_i^2}{EI} \cdot \left( \frac{1}{4}(l-l_i)^2 + \frac{1}{3} \left( l \cdot l_i - \frac{l_i^2}{2} \right) - \frac{l_i^2}{24} \right) \quad (2.52)$$

Исходными данными для расчета являются данные о пространственном положении трубопровода в ремонтном котловане, наружном и внутреннем диаметрах трубопровода, модуле Юнга материала его стенки, а также координатах расположения захватов устройств по трубопроводу.

При совмещенном изгибе трубопровода необходимо использовать полиномы, описывающие изгиб трубопровода как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. При этом применяемые расчетные зависимости для полинома горизонтального изгиба будут аналогичны описанным для полинома вертикального изгиба за исключением грузовых членов канонических уравнений  $\Delta_{ip}$ , которые для горизонтального изгиба будут равны нулю. После чего путем сложения по методу треугольника полученных вертикальной и горизонтальной проекций усилий в гидроцилиндрах рассчитываются их результирующие значения [142] по уравнению (2.53):

$$X_j^{cm} = \sqrt{X_{jv}^{cm^2} + X_{jh}^{cm^2}} \quad (2.53)$$

где  $X_{jv}^{cm}$ ,  $X_{jh}^{cm}$  – вертикальная и горизонтальная составляющие вектора силы реакции в захвате  $j$ -го устройства при удержании трубопровода в конце процесса колебаний, Н.

### 2.3.3 Расчет усилий для центрирования концов трубопровода друг с другом перед приваркой нового участка

Целью расчета является оценка величины усилий, прикладываемых со стороны захватов разработанных устройств для центрирования его концов друг относительно друга.

В соответствии со схемой установки устройств фиксирования и центрирования концов трубопровода центрирование концов осуществляется с помощью приложения к трубопроводу двух усилий. Стоит отметить, что количество применяемых устройств для центрирования равно двум со стороны каждого конца трубопровода является минимально необходимым для обеспечения угла между свариваемыми кромками концов трубопровода равного  $0^\circ$  и перемещения концов на требуемую величину [142].

Для описания прогиба трубопровода воспользуемся уравнением действующих на балку изгибающих моментов, записанным в виде (2.54):

$$EIy''(x) = M(x) \quad (2.54)$$

где  $M(x)$  – изгибающий момент, действующий на трубопровод в сечении  $x$ , Н/м.

Граничные условия для расчетной схемы в случае центрирования конца трубопровода по вертикали записываются в виде (2.55) [30]:

$$y'(0) = \theta_0; y(0) = 0; y'(l) = 0; y(l) = h \quad (2.55)$$

где  $h$  – необходимая высота подъема конца трубопровода по оси, м.

Расчетная схема центрирования концов трубопровода по вертикальной оси с действием на него распределенной нагрузки от собственного веса ( $q$ ) представлена на рисунке 2.14.

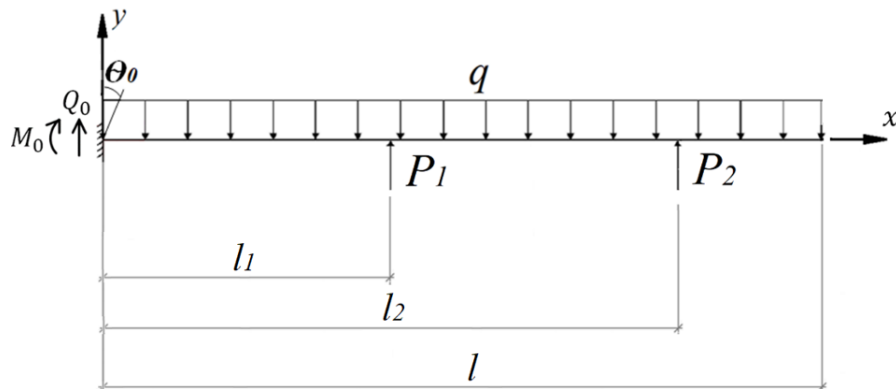


Рисунок 2.14 – Расчетная схема центрирования концов трубопровода по вертикальной оси с действием на него распределенной нагрузки от собственного веса [30]

$P_1, P_2$  – величины усилий со стороны захватов, Н

Последовательно интегрируя уравнение (2.54), с учетом граничных условий (2.55) и уравнения (2.56) получим систему уравнений (2.57) для нахождения усилий, для центрирования конца трубопровода на требуемую высоту с обеспечением соосности свариваемых труб [132, 30]:

$$\begin{cases} \frac{P_1(l-l_1)^2}{2} + \frac{P_2(l-l_2)^2}{2} + M_0l + \frac{Q_0l^2}{2} - \frac{ql^3}{6} + EI\theta_0 = 0 \\ \frac{P_1(l-l_1)^3}{6} + \frac{P_2(l-l_2)^3}{6} + \frac{M_0l^2}{2} + \frac{Q_0l^3}{6} - \frac{ql^4}{24} + EI\theta_0l - EIh = 0 \\ Q_0 = ql - P_1 - P_2 \\ M_0 = -\frac{ql^2}{2} + P_1l_1 + P_2l_2 \end{cases} \quad (2.57)$$

При совмещенном изгибе трубопровода помимо полинома, описывающего изгиб трубопровода в вертикальной плоскости, используется полином, описывающий изгиб в горизонтальной плоскости, для которого все расчеты проводятся по приведенным выше зависимостям за исключением распределенной нагрузки от собственного веса трубопровода, проекция которой на горизонтальную плоскость равна нулю. Далее полученные вертикальные и горизонтальные составляющие усилий гидроцилиндров складываются по методу треугольника для вычисления их результирующих значений по формуле (2.58) [142].

$$P_j = \sqrt{P_{jv}^2 + P_{jh}^2} \quad (2.58)$$

где  $P_{jv}$ ,  $P_{jh}$  – вертикальная и горизонтальная составляющие вектора усилий, создаваемых захватом  $j$ -го устройства для центрирования концов трубопровода, Н.

При этом возникающие в сечении  $x$  трубопровода напряжения вычисляются по формуле (2.59):

$$\sigma = \frac{M(x) \cdot D}{2I} \quad (2.59)$$

Полученные по формуле (2.58) величины напряжений должны быть в пределах их допустимых величин для материала стенки ремонтируемого трубопровода.

На основе разработанной математической модели для расчета усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования на основе коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода, была разработана программа для ЭВМ, позволяющая рассчитать искомые усилия и возникающие в стенке трубопровода напряжения и сравнить их с допустимыми значениями [31].

#### **2.4 Выводы по главе 2**

1. На основе анализа достоинств и недостатков предлагаемых в настоящее время устройств для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования была разработана конструкция устройств, позволяющих надежно зафиксировать положение концов перед разрезанием трубопровода и центрировать их перед приваркой нового участка с помощью системы гидроцилиндров (патент на изобретение № 2763096 «Устройство фиксирования и центрирования концов трубопровода при вырезке его дефектного участка» от 27.12.2021 (Приложение А), патент на полезную модель № 216133 от 17.01.2023 (Приложение Б));

2. Разработан способ ремонта магистральных трубопроводов с вырезкой дефектных участков с прикладыванием к трубопроводу усилий со стороны захватов разработанных устройств и с применением лазерного сканирования ремонтируемого участка для определения координат точек его центральной оси (патент на изобретение № 279179 от 13.03.2023 (Приложение В)).

3. Разработана математическая модель для расчета усилий, необходимых для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования на основе коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение его центральной оси. На основе разработанной математической модели получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662609 от 09.06.2023 (Приложение Г).

## ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЛИЧИН УСИЛИЙ ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ КОНЦОВ ТРУБОПРОВОДА ОТ СМЕЩЕНИЯ И ИХ ЦЕНТРИРОВАНИЯ

### 3.1 Методика проведения экспериментальных исследований величин усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования

Целью данного исследования является определение величины усилий, необходимых для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования на основе коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода.

Оценка величин усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования осуществляется путем проведения экспериментальных исследований на созданном стенде, а также моделирования деформаций трубопровода после разрезания и в процессе центрирования в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS.

*Оценка величин усилий для устранения смещения концов трубопровода и их центрирования путем конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS.*

Для оценки величин усилий для устранения резкого смещения концов упруго-изогнутого трубопровода в программном комплексе ANSYS была построена конечно-элементная модель в следующем порядке:

1. В модуле анализа динамических процессов Transient Structural создана трехмерная модель магистрального трубопровода длиной 40 м;
2. Инструментами Mesh – Sizing и Mesh – Method создана конечно-элементная сетка с размером элементов 0,1 м прямоугольной формы. В месте разрезания трубопровода размер элементов сетки равен 0,01 м, что соответствует ширине разреза;
3. Реализована жесткая заделка участка трубопровода с обоих краев инструментом Fixed Support;

4. Приложены нагрузка от собственного веса трубопровода инструментом Standard Earth Gravity и усилие к середине трубопровода вертикально вниз, инструментом Force для реализации его упругого изгиба;

5. В пункте Analysis Settings указывается количество шагов моделирования Number of Steps, равное трем. На первом шаге реализуется упругий изгиб трубопровода под действием приложенных нагрузок. На втором шаге с помощью инструмента Element Birth and Death реализуется удаление элементов сетки в месте разрезания трубопровода. На третьем шаге происходит резкое смещение концов трубопровода и с помощью инструмента Force Reaction в местах установки захватов устройств фиксирования и центрирования измеряется величина усилий для удержания концов трубопровода от резкого смещения.

Трехмерная модель магистрального трубопровода с конечно-элементной сеткой представлена на рисунке 3.1.

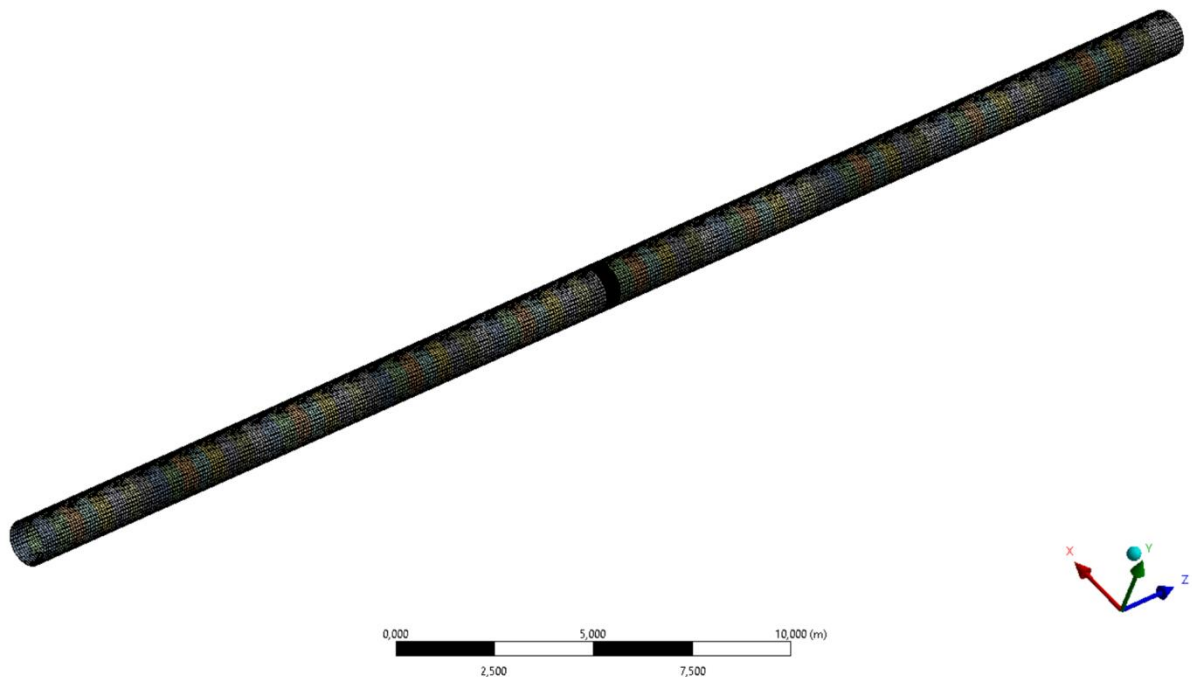


Рисунок 3.1 – Трехмерная модель магистрального трубопровода длиной 40 м с наружным диаметром 1020 мм, с толщиной стенки 12 мм с конечно-элементной сеткой

Элементы сетки в месте разрезания трубопровода представлены на рисунке 3.2.

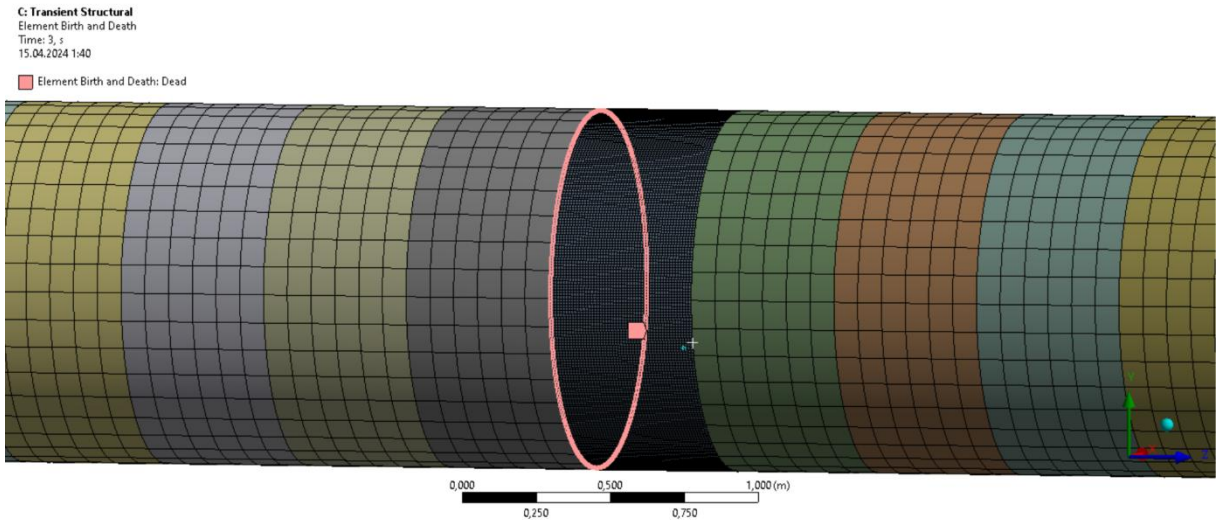


Рисунок 3.2 – Элементы сетки в месте разрезания трубопровода

Для оценки величин, необходимых для центрирования концов трубопровода создана следующая конечно-элементная модель:

1. В модуле прочностного анализа Static Structural создана модель участка магистрального трубопровода после разрезания длиной 20 м;
2. Инструментами Mesh – Sizing и Mesh – Method создана конечно-элементная сетка с размером элементов 0,1 м прямоугольной формы;
3. Реализована жесткая заделка участка трубопровода с левого края инструментом Fixed Support;
4. Приложена нагрузка от собственного веса трубопровода инструментом Standard Earth Gravity;
5. Инструментом Remote Displacement устанавливается положение конца трубопровода в нулевой отметке по вертикальной оси и нулевым углом между его осью и горизонтальной осью;
6. С помощью инструмента Force Reaction в местах установки захватов устройств фиксирования и центрирования измеряется величина усилий для центрирования конца трубопровода до уровня нулевой координаты по вертикальной оси.

Трехмерная модель участка трубопровода с приложенными к нему усилиями представлена на рисунке 3.3.

B: Static Structural  
 Static Structural  
 Time: 1, s  
 20.04.2024 14:19

A Remote Displacement  
 B Standart Earth Gravity: 9,8066 м/с<sup>2</sup>  
 C Fixed Support

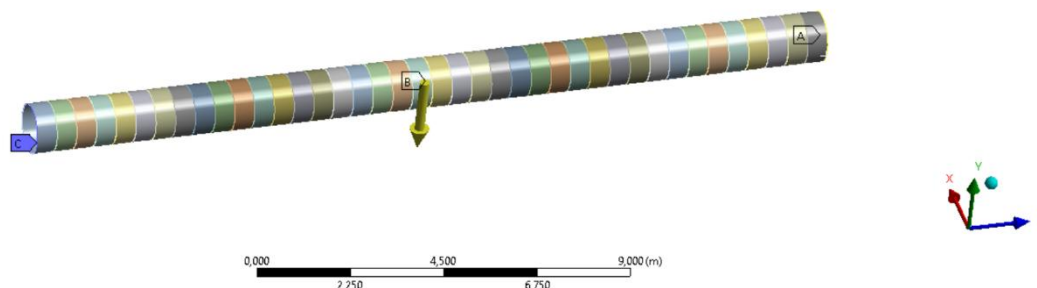


Рисунок 3.3 – Трехмерная модель участка трубопровода с приложенными к нему усилиями

*Экспериментальное исследование зависимости усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода от коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение его центральной оси.*

При проведении исследования было использовано следующее оборудование:

- стальная труба длиной 2,4 м, наружным диаметром 51 мм, толщиной стенки 3 мм, материалом стали 09Г2С с наклеенными вдоль боковой образующей крестовыми маркерами;
- электрический пресс;
- тензометрические датчики типа 2ПКБ-10-100 ГВ;
- фотокамера NAC Memrecam НХ;
- многофункциональная крейтовая система LTR-EU-16, модуль LTR 215 с возможностью вывода данных с тензометрических датчиков с частотой 5000 измерений в секунду;
- набор хомутов и оснастки для реализации расчетной схемы нагружения экспериментальной трубы.

Перечисленное оборудование представлено на рисунках 3.4-3.6.



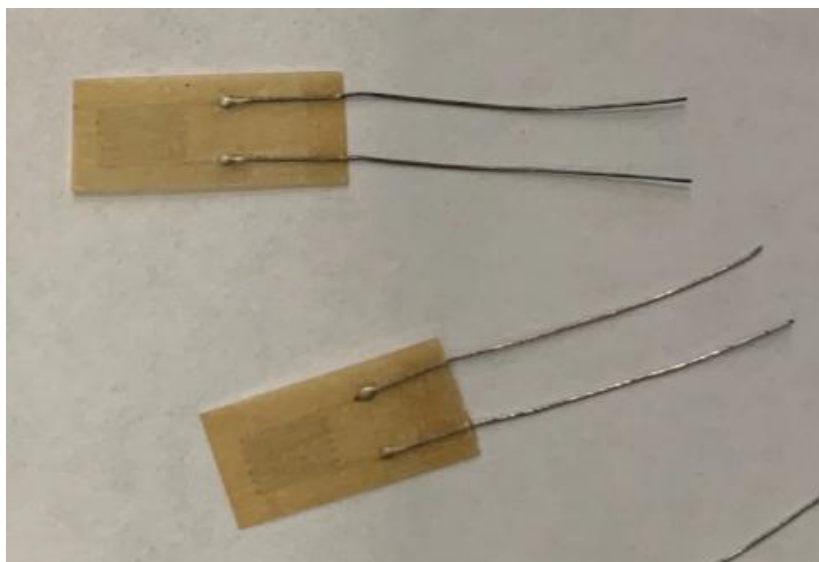


Рисунок 3.4 – Тензометрические датчики типа 2ПКБ-10-100 ГВ



Рисунок 3.5 – Фотокамера НАС Мемрекам НХ



Рисунок 3.6 – Многофункциональная крейтовая система LTR-EU-16

Расположение оборудования при проведении эксперимента представлено на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Расположение оборудования при проведении эксперимента

Исследуемая труба устанавливается в специально созданную оснастку, состоящую из основной рамы, соединенной со швеллером посредством закрученных с двух краев швеллера шпилек в отверстия в швеллере и раме с нарезанной заранее резьбой. Над швеллером устанавливаются стальные скобы, внутренний диаметр которых соответствует наружному диаметру экспериментальной трубы. Скобы устанавливаются над швеллером посредством затяжки гаек на шпильках, продеваемых в отверстия скоб и швеллера. Труба нижней образующей устанавливается на горизонтальную поверхность швеллера, установленного на чугунную раму посредством шпилек, после чего труба сверху прижимается изготовленными стальными скобами к поверхности швеллера путем затяжки гаек на шпильках. Тем самым обеспечивается жесткая заделка трубы с обеспечением нулевого угла между осью трубопровода в сечении заделки и горизонтальной осью, что при каждом нагружении трубы проверяется с помощью электронного угломера. Дополнительно чугунная рама утяжеляется грузами для обеспечения ее устойчивости в процессе эксперимента.

Внешний вид оснастки для реализации жесткой заделки трубы представлен на рисунке 3.8.



(a)



(б)

Рисунок 3.8 – Внешний вид оснастки для реализации жесткой заделки трубы

а – труба, установленная в оснастку; б – измерение угла наклона оси трубы к горизонтальной оси в месте жесткой заделки с помощью электронного угломера

Второй конец трубы для обеспечения ее упругого изгиба нагружается с помощью груза массой 15 кг. Груз, подвешенный на свободном конце трубы, представлен на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Груз, подвешенный на свободном конце трубы

Для измерения усилия, необходимого для устранения резкого смещения конца трубы, используется кольцо с установленными на нем тензометрическими датчиками. Искомое усилие численно равно величине

усилия, возникающего в тензометрическом кольце в момент смещения конца. Тензометрические датчики установлены на кольцо на одной из его боковых образующих по одному с наружной и внутренней сторон кольца по полумостовой схеме соединения, представленной на рисунке 3.10.

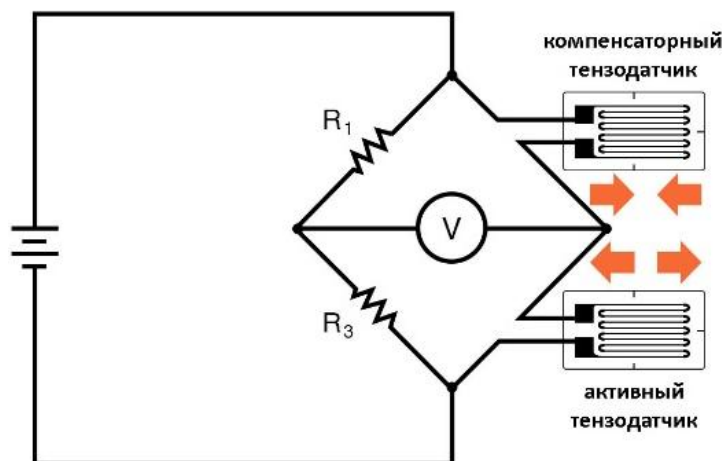


Рисунок 3.10 – Полумостовая схема соединения тензометрических датчиков

Выбор кольца осуществлялся, исходя из условия отсутствия остаточной деформации при приложении к нему рассчитанных по разработанной математической модели нагрузок при резком смещении концов трубопровода. Отсутствие остаточных деформаций подтверждалось последовательным нагружением выбранного кольца электрическим прессом до нагрузки, превышающей расчетную минимум в 1,5 раза. В процессе нагружения осуществлялось измерение перемещения штока электрического пресса. При этом при полном снятии нагрузки с кольца шток пресса возвращается в первоначальное положение.

Так как при приложении нагрузки к тензометрическому кольцу осуществляется измерение величины электрического напряжения, проходящего через тензометрические датчики, установленные на кольце, необходимо осуществить тарирование датчиков с целью дальнейшего расчета коэффициента тарирования, позволяющего определить, на сколько меняется величина электрического напряжения, проходящего через

тензометрический датчик при изменении прикладываемой к кольцу нагрузки на 1 Н.

Для вычисления коэффициента тарирования (мВ/Н) используется формула (3.1):

$$K_m = \frac{U_\delta}{F}, \quad (3.1)$$

где  $U_\delta$  – величина электрического напряжения, проходящего через тензометрический датчик, мВ;  $F$  – величина прикладываемой нагрузки к тензометрическому кольцу, Н.

Максимальная расчетная нагрузка на кольцо в процессе экспериментов составляет 752,422 Н. Исходя из этого, максимальная нагрузка в процессе тарирования тензометрических датчиков составляет 1200 Н, шаг нагружения 200 Н. Приложение и снятие нагрузки осуществлялось с помощью электрического пресса Testometric M350-5CT.

Процесс тарирования тензометрических датчиков представлен на рисунке 3.11.

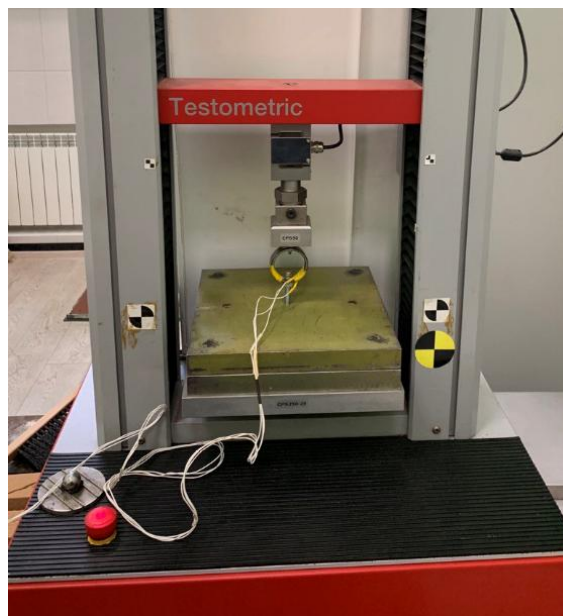


Рисунок 3.11 – Процесс тарирования тензометрических датчиков при приложении нагрузки со стороны электрического пресса



График изменения величины электрического напряжения в тензометрическом датчике в процессе тарирования представлен на рисунке 3.12.

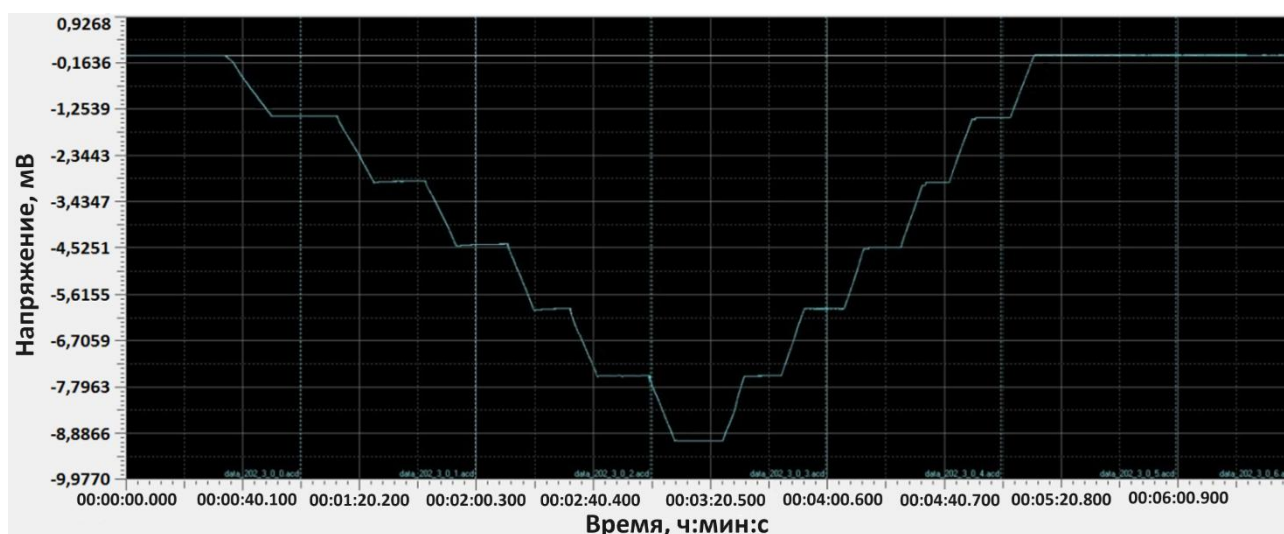


Рисунок 3.12 – График изменения величины напряжения в тензометрическом датчике в процессе тарирования

На графике видно, что остаточная деформация кольца после снятия нагрузки отсутствует, о чем свидетельствует полное возвращение величины электрических напряжений в датчике к исходной нулевой величине.

Результаты тарирования представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты тарирования тензометрических датчиков

Приложение нагрузки			Снятие нагрузки		
Напряжение, мВ	Усилие, Н	Коэф-т тарирования	Напряжение, мВ	Усилие, Н	Коэф-т тарирования
0	0	0	-6,67912	1200	-0,00557
-1,11181	200	-0,00556	-5,55877	1000	-0,00556
-2,22873	400	-0,00557	-4,44865	800	-0,00556
-3,33760	600	-0,00556	-3,33711	600	-0,00556
-4,44869	800	-0,00556	-2,22849	400	-0,00557
-5,55943	1000	-0,00556	-1,11183	200	-0,00556
-6,67915	1200	-0,00557	0	0	0

Величина коэффициента тарирования, исходя из его среднеарифметического значения, полученного в результате приложения и снятия нагрузки, составляет 0,0056 мВ/Н.

После тарирования тензометрическое кольцо прикручивалось на хомут, установленный на экспериментальной трубе.

Внешний вид тензометрического кольца, установленного на трубе, представлен на рисунке 3.13.



Рисунок 3.13 – Внешний вид тензометрического кольца, установленного на трубу

В качестве неподвижной опоры в процессе эксперимента использован шток электрического пресса, который опускался до момента его касания с тензометрическим кольцом. Момент касания определяется по повышению нагрузки на кольцо, измеряемой тензодатчиками.

Измерение величины усилий, необходимых для устранения резкого смещения конца трубы, осуществлялось следующим образом:

1. Обеспечивается жесткая заделка исследуемой трубы в выбранном ее сечении;
2. На свободный конец трубы подвешивается груз массой 15 кг для обеспечения ее изгиба;
3. Осуществляется фотографирование изгиба трубы фотокамерой со стороны боковой образующей с наклеенными на нее крестовыми маркерами;
4. В выбранном сечении трубы устанавливается хомут с тензометрическим кольцом и опускается шток электрического пресса до момента касания с кольцом;
5. Отсоединяется груз, осуществляется измерение величины силы реакции, возникающей в неподвижной опоре в процессе колебаний конца

трубы, тензометрическими датчиками, установленными на кольце, с частотой пять тысяч измерений в секунду.

Фотографии исследуемой трубы при выбранных расстояниях от сечения жесткой заделки до свободного конца с грузом представлены на рисунках 3.14-3.16.



Рисунок 3.14 – Труба в результате ее изгиба при расстоянии 1,85 м от сечения жесткой заделки до свободного конца

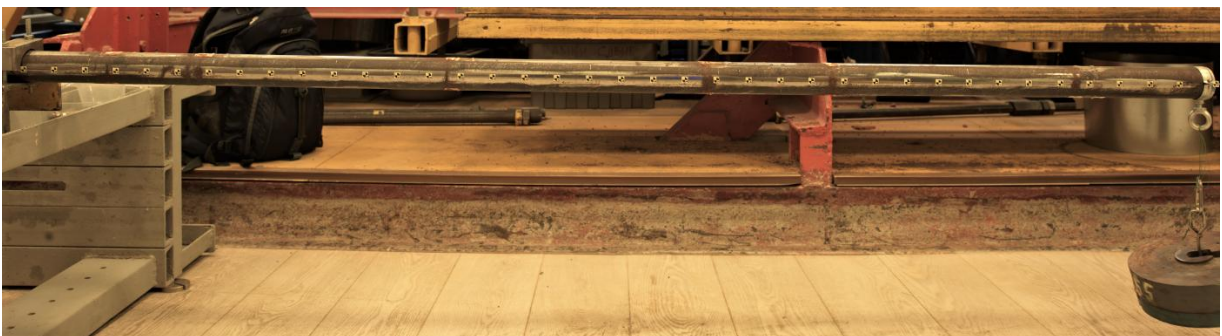


Рисунок 3.15 – Труба в результате ее изгиба при расстоянии 1,9 м от сечения жесткой заделки до свободного конца



Рисунок 3.16 – Труба в результате ее изгиба при расстоянии 2 м от сечения жесткой заделки до свободного конца



### 3.2 Результаты экспериментальных исследований величин усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования

В результате конечно-элементного моделирования смещения концов трубопровода при его разрезании и их центрирования в программном комплексе ANSYS получены результаты, представленные в таблицах 3.2 и 3.3. Таблица 3.2 – Коэффициенты полиномов центральной оси трубопроводов, полученные путем аппроксимирования координат точек оси в шагом 0,5 м

Коэффициенты полинома			
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>e</i>
Трубопровод $D = 820$ мм, $d = 796$ мм, $l = 20$ м, $l_1 = 10$ м, $l_2 = 19,5$ м			
$-1,998 \cdot 10^{-8}$	$2,286 \cdot 10^{-5}$	$-5,271 \cdot 10^{-4}$	$-9,890 \cdot 10^{-5}$
Трубопровод $D = 1020$ мм, $d = 996$ мм, $l = 20$ м, $l_1 = 10$ м, $l_2 = 19,5$ м			
$-1,301 \cdot 10^{-7}$	$1,741 \cdot 10^{-5}$	$-4,193 \cdot 10^{-4}$	$-9,695 \cdot 10^{-5}$
Трубопровод $D = 1220$ мм, $d = 1196$ мм, $l = 20$ м, $l_1 = 10$ м, $l_2 = 19,5$ м			
$-9,340 \cdot 10^{-8}$	$1,448 \cdot 10^{-5}$	$-3,604 \cdot 10^{-4}$	$-1,061 \cdot 10^{-4}$
Трубопровод $D = 1420$ мм, $d = 1396$ мм, $l = 20$ м, $l_1 = 10$ м, $l_2 = 19,5$ м			
$-7,092 \cdot 10^{-8}$	$1,128 \cdot 10^{-5}$	$-2,821 \cdot 10^{-4}$	$-1,065 \cdot 10^{-4}$

Таблица 3.3 – Величины усилий для устранения смещения концов трубопровода X1, X2 и их центрирования P1, P2

Параметр	Величина по математической модели	Величина по ANSYS	Относительное отклонение, %
Трубопровод $D = 820$ мм, $d = 796$ мм, $l = 20$ м, $l_1 = 10$ м, $l_2 = 19,5$ м			
$X_1$ , Н	-75 090,4	-73 033,7	2,739
$X_2$ , Н	39 340,19	38 701,3	1,624
$P_1$ , Н	31 633,51	31 375,06	0,817
$P_2$ , Н	8 381,638	8 328,75	0,631
Трубопровод $D = 1020$ мм, $d = 996$ мм, $l = 20$ м, $l_1 = 10$ м, $l_2 = 19,5$ м			
$X_1$ , Н	-124 755	-122 395	1,892
$X_2$ , Н	56 599,64	54 497,53	3,714
$P_1$ , Н	40 786,64	40 496,24	0,712
$P_2$ , Н	10 277,87	10 173,55	1,015
Трубопровод $D = 1220$ мм, $d = 1196$ мм, $l = 20$ м, $l_1 = 10$ м, $l_2 = 19,5$ м			
$X_1$ , Н	-200 141	-190 508	4,813
$X_2$ , Н	96 876,98	93 495	3,491
$P_1$ , Н	51 508,87	51 378,55	0,253
$P_2$ , Н	11 962,48	11 873	0,748

## Продолжение таблицы 3.3

Трубопровод $D = 1420$ мм, $d = 1396$ мм, $l = 20$ м, $l_1 = 10$ м, $l_2 = 19,5$ м			
$X_1$ , Н	-257 847	-254 152	1,433
$X_2$ , Н	155 932	149 980,1	3,817
$P_1$ , Н	63 101,2	62 692,3	0,648
$P_2$ , Н	529,754	526,6761	0,581

Исходя из полученных данных, рассчитанные по разработанной математической модели величины усилий отличаются от результатов конечно-элементного моделирования в ANSYS в пределах 5%, что свидетельствует о достаточно высокой точности математической модели.

По данным проведенных экспериментальных исследований на созданном стенде в соответствии с разработанной математической моделью осуществлялся расчет величин усилий для устранения смещения конца трубы.

Приведем результаты расчетов и эксперимента для трубы длиной 2 м с тензометрическим кольцом, установленным на расстоянии 1,15 м от места жесткой заделки трубы.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Исходные данные для расчета усилий

Параметр	Величина
Длина трубы, м	2
Расстояние от жесткой заделки до кольца, м	1,15
Наружный диаметр, м	0,051
Внутренний диаметр, м	0,045
Модуль Юнга, Па	$2 \cdot 10^{11}$
Материал стали	09Г2С
Плотность стали, кг/м <sup>3</sup>	7850

График прогиба трубы, полученный в результате фотографирования крестовых маркеров, наклеенных на боковую образующую трубы, после ее изгиба в результате прикрепления груза массой 15 кг на ее свободном конце представлен на рисунке 3.17.

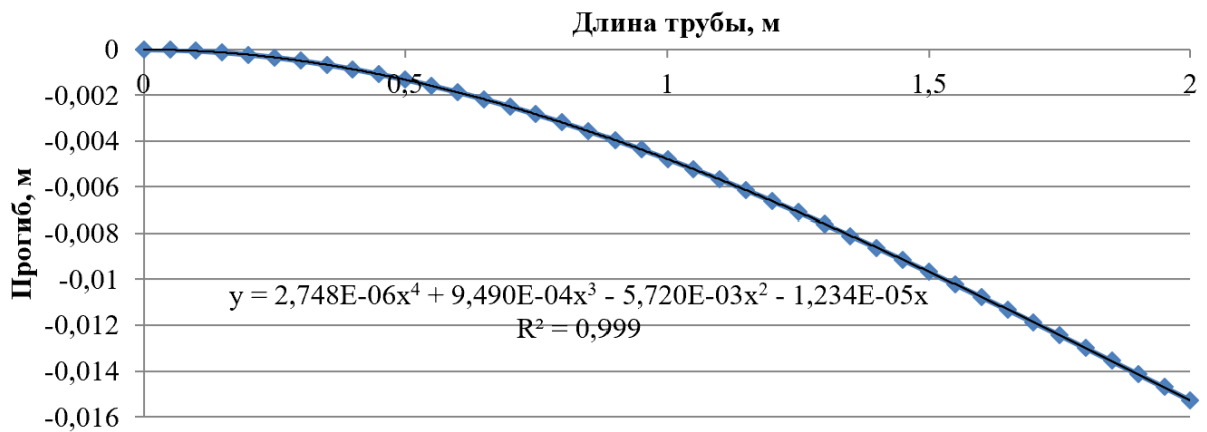


Рисунок 3.17 – График прогиба исследуемой трубы длиной 2 м

Коэффициенты полинома, описывающего изгиб трубы, представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Коэффициенты полинома, описывающего изгиб трубы длиной 2 м

Коэффициент	$a$	$b$	$c$	$d$
Значение	$2,748 \cdot 10^{-6}$	$9,490 \cdot 10^{-4}$	$-5,720 \cdot 10^{-3}$	$-1,234 \cdot 10^{-5}$

Далее на основе полученных коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси исследуемой трубы, проведем расчет максимального значения силы реакции, возникающей в кольце с тензометрическими датчиками в процессе колебаний по разработанной математической модели.

В результате расчета максимальная сила реакции, возникающей в тензометрическом кольце в процессе колебаний трубы, составила - 567,939 Н.

В результате проведенного эксперимента для трубы длиной 2 м и при расстоянии от жесткой заделки до места установки тензометрического кольца 1,15 м получен график изменения величины напряжения, проходящего через тензодатчик в процессе колебаний трубы, представленный на рисунке 3.18.

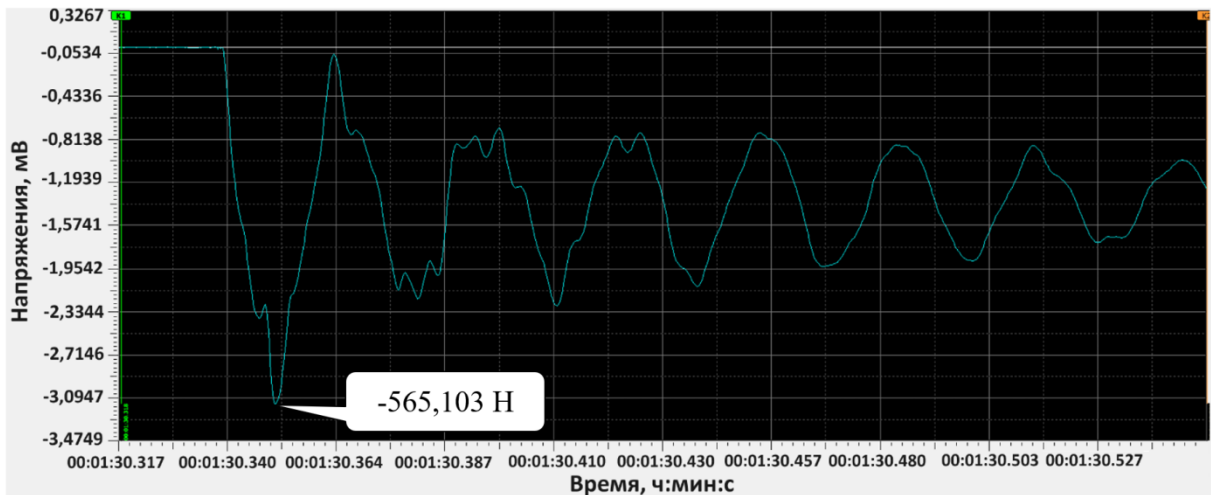


Рисунок 3.18 – График изменения величины напряжения, проходящего через проволоку тензодатчика в процессе колебаний трубы длиной 2 м при расстоянии от жесткой заделки до места установки кольца 1,15 м

График изменения величины динамической силы реакции  $X$ , возникающей в тензометрическом кольце, в процессе колебаний трубы длиной 2 м при расстоянии от жесткой заделки до места установки кольца 1,15 м представлен на рисунке 3.19.

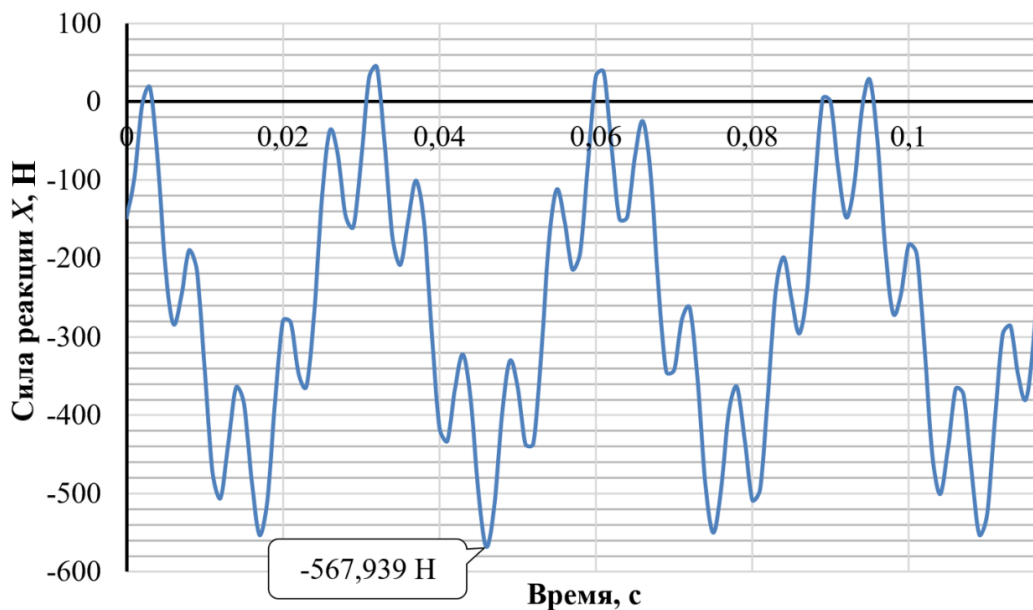


Рисунок 3.19 – График изменения величины силы реакции  $X$ , возникающей в тензометрическом кольце, в процессе колебаний трубы длиной 2 м при расстоянии от жесткой заделки до места установки кольца 1,15 м

Максимальная величина напряжения, проходящего через тензометрический датчик, с учетом коэффициента тарирования соответствует усилию -565,103 Н.

В соответствии с разработанной математической моделью максимальное усилие, которое необходимо создать для удержания конца трубы от смещения составляет -567,939 Н.

В результате проведенных экспериментальных исследований и расчетов по разработанной математической модели были получены данные, представленные в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты расчетов и эксперимента по измерению значения силы реакции, возникающей в неподвижной опоре, при резком смещении конца трубы

Длина трубы, м	Расст. до кольца, м	Статическое усилие $X^{ст}$ , Н		Отн. откл., %	Динамическое усилие $X_1$ , Н		Отн. откл., %
		Эксп-т	Расчет		Эксп-т	Расчет	
1,85	0,75	-383,116	-391,725	2,198	-725,430	-752,422	3,587
	0,9	-314,774	-317,659	0,908	-628,565	-639,155	1,657
	1,05	-264,129	-264,679	0,208	-563,895	-584,267	3,487
	1,2	-224,104	-224,836	0,326	-533,033	-549,046	2,917
1,9	0,85	-339,946	-347,843	2,270	-749,179	-761,130	1,570
	0,95	-296,993	-305,754	2,865	-635,618	-667,508	4,776
	1,05	-269,633	-271,640	0,739	-599,424	-606,608	1,184
	1,15	-249,504	-243,408	-2,504	-527,333	-539,391	2,235
2	1,05	-278,784	-285,190	2,246	-609,070	-629,047	3,176
	1,15	-253,874	-255,932	0,804	-565,103	-567,939	0,499
	1,3	-220,452	-220,390	-0,028	-469,764	-481,522	2,442
	1,35	-214,948	-210,271	-2,224	-439,595	-450,259	2,368

На основании представленных данных таблицы результаты проведенного экспериментального исследования отличаются от результатов расчетов по разработанной математической модели в пределах 5%, что свидетельствует о достаточно высокой точности оценки величин усилий, необходимых для устранения резкого смещения концов трубопровода, на основе разработанной модели.

### 3.3 Выводы по главе 3

1. Разработан и сконструирован экспериментальный стенд для измерения величин усилий, необходимых для устранения смещения конца трубы после снятия с него статической нагрузки;
2. Относительные отклонения полученных в результате экспериментального исследования и конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS значений величин усилий, необходимых для устранения смещения конца трубопровода и их центрирования от их значений, рассчитанных по разработанной математической модели, составили величину до 5%, что свидетельствует о высокой достоверности результатов расчетов по математической модели.

## **ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ВЕЛИЧИН УСИЛИЙ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ КОНЦОВ ТРУБОПРОВОДА И ИХ ЦЕНТРИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ОБЛАКА ТОЧЕК ЕГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ**

### **4.1 Методика проведения экспериментальных исследований величин усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования по данным его лазерного сканирования**

Целью исследований является разработка способа оценки величин усилий, необходимых для устранения резкого смещения концов трубопровода и их дальнейшего центрирования, на основе коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси ремонтируемого участка трубопровода, полученных в результате обработки координат облака точек его лазерного сканирования.

Способ заключается в лазерном сканировании ремонтируемого участка трубопровода, создании цилиндров диаметром не менее наружного диаметра трубопровода с горизонтальным расположением их осей вдоль полученного облака точек лазерного сканирования, аппроксимации точек, принадлежащих каждому из созданных цилиндров уравнением эллипса, определении центров полученных эллипсов и аппроксимации данных центров уравнением полинома четвертой степени.

Порядок реализации способа обработки данных лазерного сканирования ремонтируемого участка трубопровода представлен на рисунке 4.1.

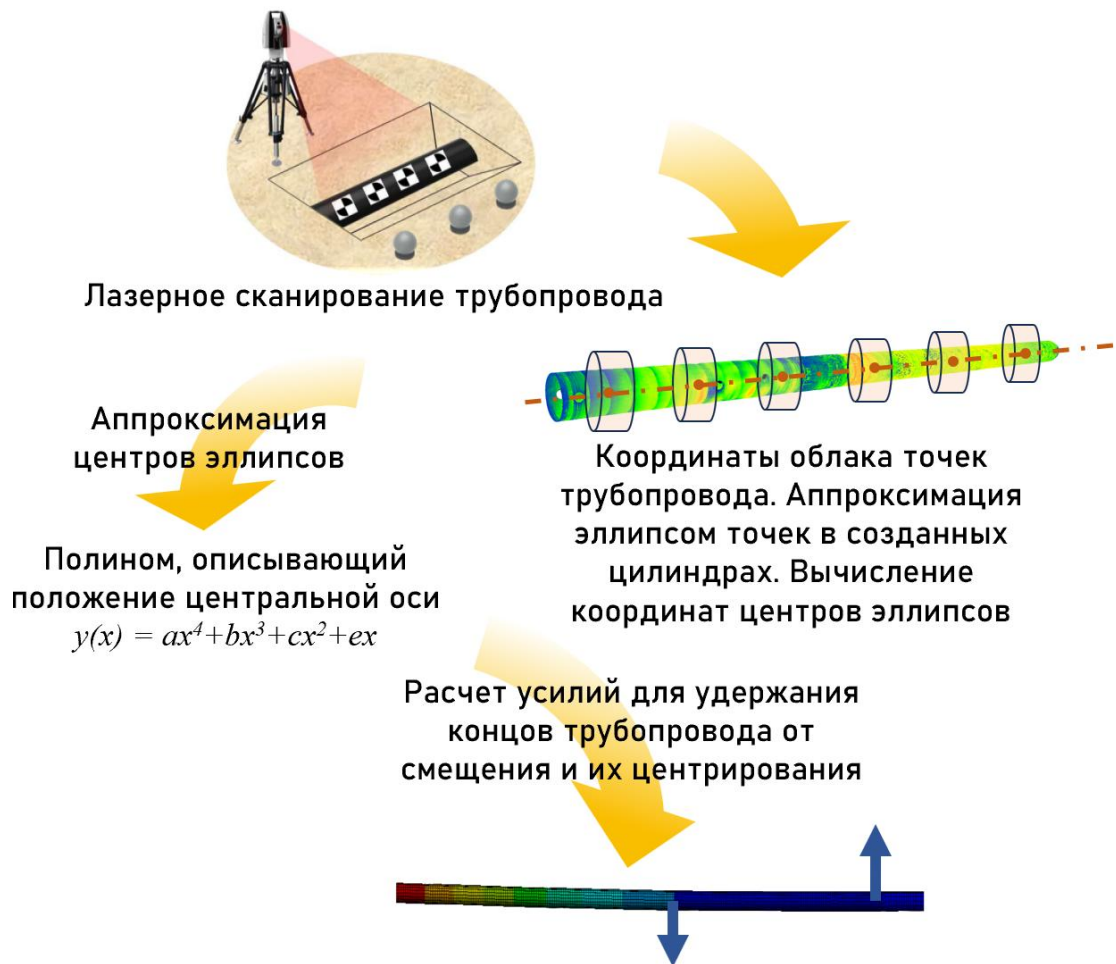


Рисунок 4.1 – Порядок реализации способа оценки коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода

*Лазерное сканирование неизолированной трубы.*

Для определения коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси неизолированной трубы, и расчете на их основе усилий фиксирования и центрирования ее конца применялось следующее оборудование:

- труба длиной 2,4 м, наружным диаметром 51 мм и толщиной стенки 3 мм;
- лазерный сканер Hexagon RS6 Laser Scanner;
- фотокамера Hasselblad H5D 200 MS с разрешением снимков 200 МП;
- электрический пресс Testometric M350-5CT для создания нагрузки на свободном конце трубопровода [142].



Применяемое в процессе лабораторных испытаний оборудование представлено на рисунках 4.2-4.4.



Рисунок 4.2 – Исследуемая труба длиной 2,4 м, наружным диаметром 51 мм и толщиной стенки 3 мм [142]



(а)



(б)

Рисунок 4.3 – Применяемые в процессе эксперимента лазерный сканнер и электрический пресс [142]

а – Лазерный сканер Hexagon RS6 Laser Scanner; б – Электрический пресс Testometric M350-5CT



Рисунок 4.4 – Рабочее пространство при проведении испытаний [142]

Вдоль боковой образующей трубы наклеиваются крестовые маркеры через каждые 5 см, фотосъемка которых осуществляется с помощью фотокамеры Hasselblad H5D 200 MS.

Предварительно перед проведением испытаний исследуемый трубопровод зачищается шлифовальной машинкой в местах наклейки маркеров для лучшей адгезии.

Первый этап исследования включал в себя следующий порядок действий:

1. Реализуется жесткая заделка левого края трубы его защемлением в подготовленной оснастке;
2. Над вторым концом трубы устанавливается шток электрического пресса;
3. Размещается видеокамера напротив наклеенных на трубу маркеров;
4. Осуществляется нагружение свободного конца трубы усилием 150 Н опусканием штока электрического пресса, тем самым реализуется ее упругий изгиб;

5. Осуществляется фотографирование трубы в изогнутом положении с помощью фотокамеры;
6. Осуществляется лазерное сканирование трубы в изогнутом положении лазерным сканером с плотностью не менее 9 точек/см<sup>2</sup>;
7. Снимается нагрузка со свободного конца трубы путем поднятия штока электрического пресса [142].

Исследуемая труба в изогнутом состоянии представлена на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Исследуемая труба в изогнутом состоянии [142]

Процесс лазерного сканирования исследуемого трубопровода представлен на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Процесс лазерного сканирования исследуемого трубопровода [142]

Пример полученного облака точек трубы представлен на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Облако точек трубы длиной 2,2 м при его изгибе

В результате лазерного сканирования были получены облака точек трубы при ее различных исследуемых длинах для дальнейшего перехода от облаков точек к уравнению изогнутой оси трубы.

На втором этапе работ осуществлялось построение кривой оси трубопровода при его упругом изгибе, реализованном в процессе лабораторных испытаний, по данным лазерного сканирования.

1. В первую очередь производилась обработка облака точек трубы, заключающаяся в фильтрации облака точек, то есть удалении из него точек, среднеквадратичное отклонение которых от их общей совокупности составляет более 0,1 мм. Фильтрация точек осуществлялась в объеме созданных цилиндрических поверхностей высотой 5 мм, находящихся посередине между крестовыми маркерами с шагом 5 см. Центральные оси созданных цилиндров расположены параллельно горизонтальной оси системы координат, в которой производится сканирование. Путем выделения необходимого диапазона до 0,1 мм на графике отклонений Geometry Fit Graph, изображенном на рисунке 4.8 в программном обеспечении Spatial Analyzer производилось удаление множества точек, не удовлетворяющих предъявленным требованиям по величине отклонения [142].

Интерфейс программы SpatialAnalyzer при обработке облака точек представлен на рисунке 4.8.



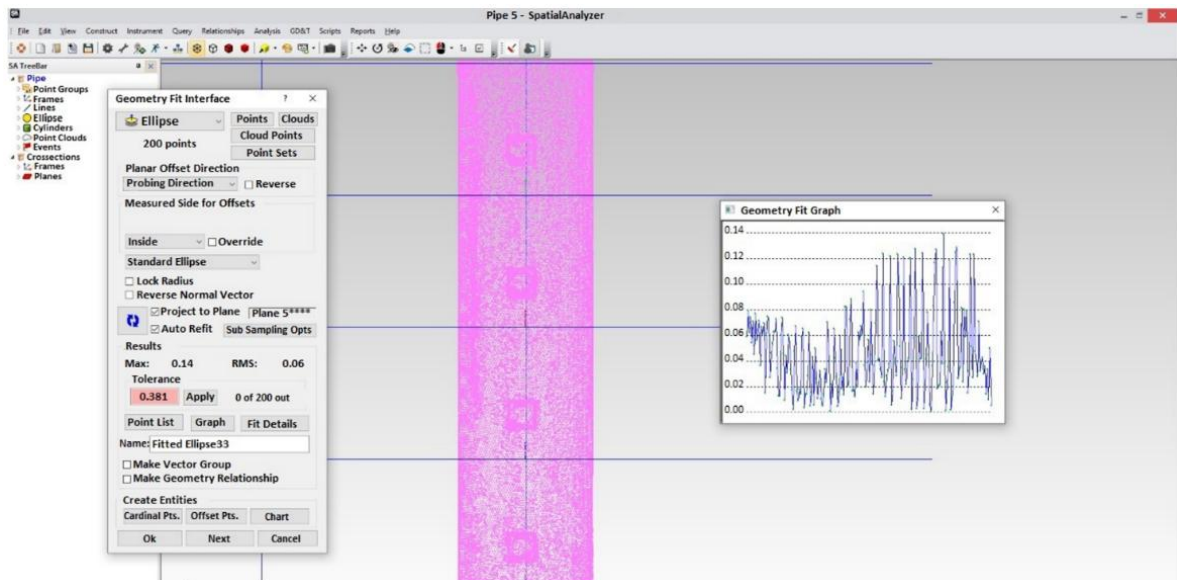


Рисунок 4.8 – Интерфейс программы SpatialAnalyzer при обработке облака точек [142]

Далее в каждом созданном цилиндре отфильтрованные точки, принадлежащие ему, аппроксимировались эллипсом, посредством инструментов SpatialAnalyzer. Несмотря на то, что сечение трубы круглое, для аппроксимации было выбрано уравнение эллипса в связи с тем, что при изгибе трубы происходит овализация ее сечений [44]. Для каждого построенного эллипса была найдена координата его центра. Полученные координаты центров и являются точками изогнутой оси трубопровода [142].

Третий этап исследования заключается в регистрации положения крестовых маркеров, наклеенных на боковую образующую трубы, на основе ее фотографий, полученных ранее.

Фотографии загружаются в программу ТЕМА Motion, указываются положения центров маркеров, вводится расстояние между двумя из них. Исходя из введенного расстояния программой рассчитывается количество пикселей изображения, приходящихся на один миллиметр расстояния вдоль оси трубы. Интерфейс программы представлен на рисунке 4.9.

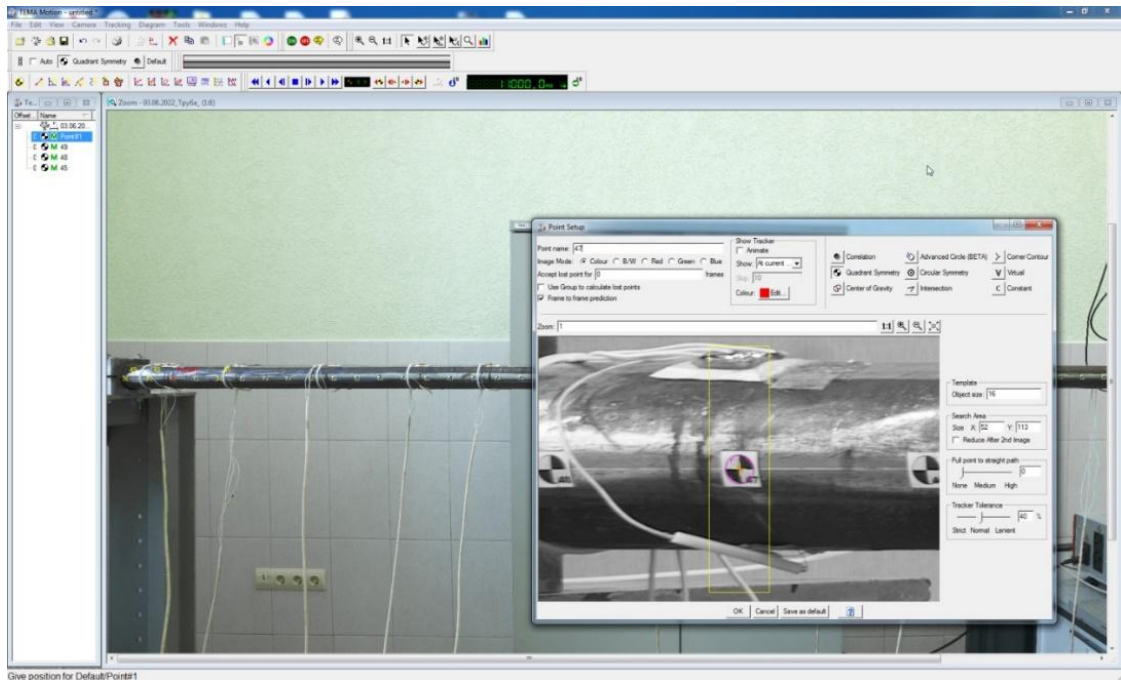


Рисунок 4.9 – Интерфейс программы TEMA Motion [142]

Фотография трубы с отмеченными на ней центрами маркеров представлена на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – Фотография трубы с отмеченными на ней центрами маркеров [142]

Полученные центры маркеров являются точками изогнутой оси трубопровода.

Полученные по двум описанным методам точки аппроксимировались полиномом четвертой степени в табличном процессоре MS Excel с выводом соответствующего уравнения полинома, которое является уравнением изогнутой оси трубы при ее изгибе. На основе найденных по двум методам коэффициентов полинома осуществляется расчет усилий для устранения резкого смещения конца трубы и его центрирования до нулевой отметки по вертикальной оси. После чего осуществляется определение относительных отклонений рассчитанных величин усилий на основе данных, полученных в

результате фотографирования крестовых маркеров и лазерного сканирования трубы [29, 142].

*Определение влияния неровностей изоляционного покрытия трубопровода и величины угла сканируемого сектора на результаты определения усилий для устранения смещения концов трубопровода и их центрирования.*

На результат оценки коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода по данным его лазерного сканирования, и, как следствие, на результат расчета усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования существенное влияние оказывают следующие факторы:

1. При эксплуатации магистральных нефте- и газопроводов слой их наружной изоляции сползает, образуя складки, а также нарушается его целостность. В результате лазерного сканирования таких трубопроводов в процессе ремонтных работ могут быть получены погрешности при определении пространственного положения центральной оси трубопровода. Это связано с тем, что точки, принадлежащие центральной оси трубопровода, строятся на основе аппроксимации уравнением эллипса точек, принадлежащих поверхности трубопровода, после чего определяются координаты центров полученных эллипсов, которые и являются точками центральной оси трубопровода. Ввиду этого при таких отклонениях полученного облака точек поверхности трубопровода от его фактической поверхности, как, например, неровности изоляции, возможны существенные погрешности при определении уравнения центральной оси трубопровода.

Неровности изоляционного покрытия, характерные для эксплуатируемого магистрального трубопровода, представлены на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 – Неровности изоляционного покрытия, характерные для эксплуатируемого магистрального трубопровода

2. В процессе лазерного сканирования магистрального трубопровода в полевых условиях не реализуемо сканирование всей его поверхности, что обусловлено возможностью проведения сканирования только с края траншеи над трубопроводом. В связи с этим сканируется верхний сектор трубопровода с определенной величиной угла.

Исходя из вышесказанного, целью данного исследования является оценка влияния неровностей изоляционного покрытия, а также величины угла сканируемого сектора трубопровода на точность определения усилий, необходимых для устранения резкого смещения его концов и их центрирования, вычисляемых на основе коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода по данным его лазерного сканирования.



Достижение поставленной цели исследования проводится в несколько этапов:

1. Проведение лазерного сканирования исследуемой трубы без слоя изоляционного покрытия;

2. Изоляция исследуемой трубы слоем покрытия с созданными его неровностями и дефектами;

3. Проведение лазерного сканирования изолированной трубы;

4. Обработка облака точек исследуемого трубопровода без слоя изоляционного покрытия и после изоляции с дальнейшим переходом от облака точек трубы к координатам ее центральной оси;

5. Уменьшение угла сканируемого сектора трубы от  $180^\circ$  с шагом  $30^\circ$  и определение на основе полученных облаков точек координат центральной оси трубы;

6. Расчет абсолютных отклонений координат точек центральной оси изолированной трубы при каждом из углов сканируемого сектора относительно неизолированной трубы;

7. Суммирование координат точек центральной оси упруго-изогнутой неизолированной трубы, полученных по результатам фотосъемки крестовых маркеров, с рассчитанными их абсолютными отклонениями в результате изоляции трубы при каждом из углов сканируемого сектора с последующей аппроксимацией полученных точек полиномом четвертой степени;

8. Расчет величин усилий для устранения смещения концов трубопровода и их центрирования на основе коэффициентов каждого из полученных полиномов;

8. Оценка величины относительного отклонения рассчитанных усилий для на основе коэффициентов каждого из полученных полиномов изолированной трубы от величин усилий для неизолированной трубы;

При проведении исследования применялось следующее оборудование:

- труба длиной 2,4 м, наружным диаметром 51 мм и толщиной стенки 3 мм;
- электронный тахеометр с функцией лазерного сканирования Leica MS60;
- сферические отражатели для привязки положения лазерного сканера к имеющейся системе координат при его перемещении [142].

Используемый лазерный сканер представлен на рисунке 4.12.



Рисунок 4.12 – Лазерный сканер Leica MS60

Проведение лазерного сканирования исследуемого трубопровода осуществлялось в следующем порядке:

1. Перед проведением лазерного сканирования необходимо создать систему координат привязав лазерный сканер по положению четырех сферических отражателей, установленных в его зону видимости.

Создание системы координат путем позиционирования лазерного сканера по сферическим отражателям предоставлено на рисунке 4.13.



Рисунок 4.13 – Создание системы координат путем позиционирования лазерного сканера по сферическим отражателям

Результат создания системы координат, в рамках которой осуществляется сканирование, и расположение лазерного сканера относительно сферических отражателей отображается в используемом программном обеспечении Spatial Analyzer и представлен на рисунке 4.14.

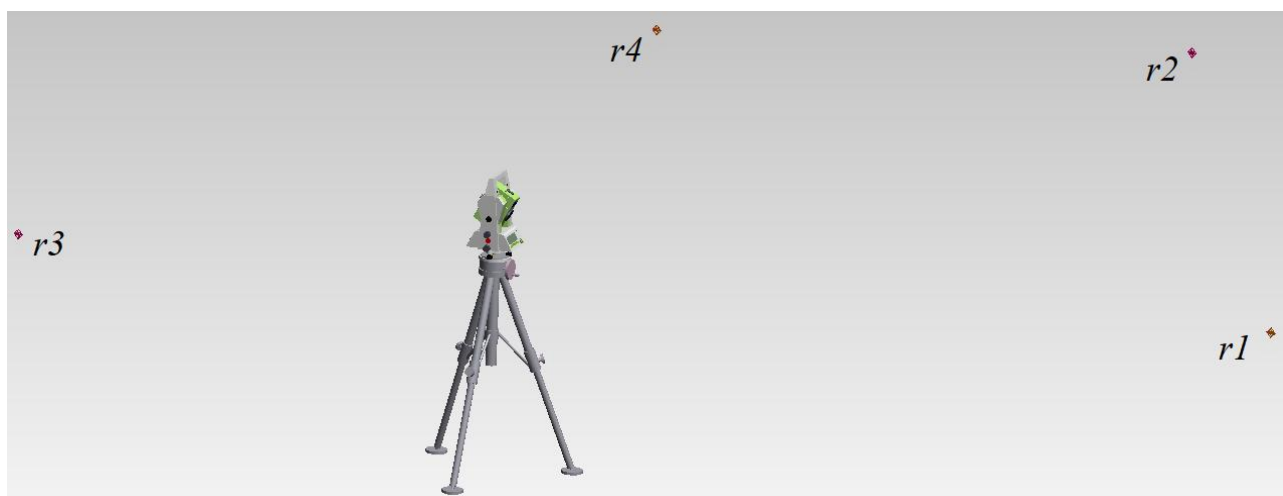


Рисунок 4.14 – Система координат, созданная путем привязки лазерного сканера к сферическим отражателям  $r1$ ,  $r2$ ,  $r3$  и  $r4$

2. Лазерным лучом сканера указываются точки периметра сканирования вокруг исследуемого трубопровода. Для этого луч сканера направляется поочередно на точки периметра, после чего координата каждой из них фиксируется в специализированном программном обеспечении Spatial Analyzer. Для создания периметра были выбраны 6 точек. Результат создания периметра сканирования представлен на рисунке 4.15.

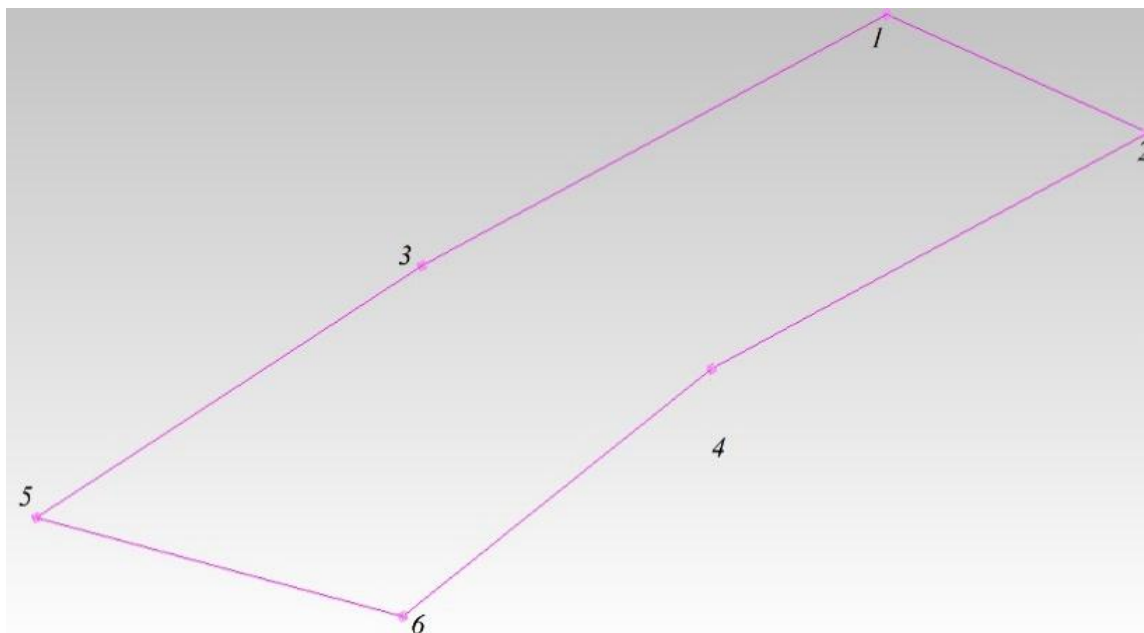


Рисунок 4.15 – Периметр сканирования, созданный путем указания точек периметра лучом сканера

1, 2, 3, 4, 5, 6 – точки, ограничивающие зону сканирования

3. Запускается процесс лазерного сканирования исследуемой трубы в рамках полученного периметра с плотностью точек не менее 9 точек/см<sup>2</sup>.

4. Лазерный сканер перемещается в положение, с которого осуществляется сканирование второй стороны трубы. После перемещения лазерного сканера привязка его к ранее созданной системе координат осуществляется наведением на те же четыре сферических отражателя  $r1$ ,  $r2$ ,  $r3$  и  $r4$ , что и были использованы ранее.

После проведения лазерного сканирования трубы с двух ее сторон получено ее облако точек, представленное на рисунке 4.16.

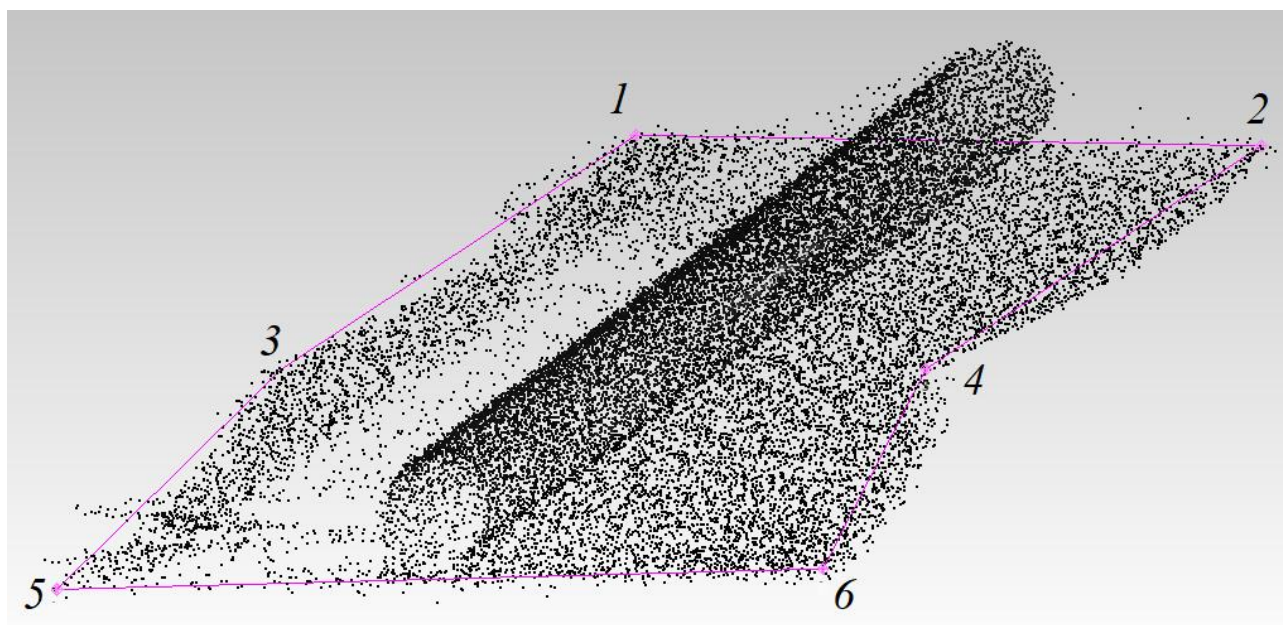


Рисунок 4.16 – Облако точек лазерного сканирования трубопровода в установленном периметре сканирования

1, 2, 3, 4, 5, 6 – точки, ограничивающие зону сканирования

Далее осуществляется изоляция исследуемой трубы. В качестве изоляционного покрытия была выбрана черная изолента, что позволяет имитировать требуемые неровности и отслоения изоляционного покрытия магистрального трубопровода.

Изолированная труба представлена на рисунке 4.17.



Рисунок 4.17 – Изолированная труба

Величина созданных неровностей изоляционного покрытия трубы составляет от 0,02 до 0,14 от ее наружного диаметра (величина неровностей от 1 до 7 мм). С учетом полученной величины неровностей относительно наружного диаметра трубы для магистрального трубопровода наружным диаметром 1420 мм величина неровностей составила бы от 28,4 мм до 142 мм, что существенно больше неровностей изоляции, образующихся при



эксплуатации магистральных трубопроводов. Исходя из этого, можно сделать вывод, что оценка влияния неровностей изоляционного покрытия на результат определения усилий для устранения смещения концов трубопровода и их центрирования будет несколько завышена, и полученные выводы о степени влияния неровностей изоляции на результаты сканирования могут быть в полной мере применимы для магистральных трубопроводов [142].

Получение координат точек центральной оси исследуемого трубопровода на основе облака точек его лазерного сканирования осуществлялось следующим образом:

1. В первую очередь осуществлялось удаление точек из облака, образованных ввиду краевого эффекта, который образуется на границе видимой и невидимой зон для лазерного сканера. Такие точки не принадлежат поверхности исследуемого трубопровода и представлены на рисунке 4.18.

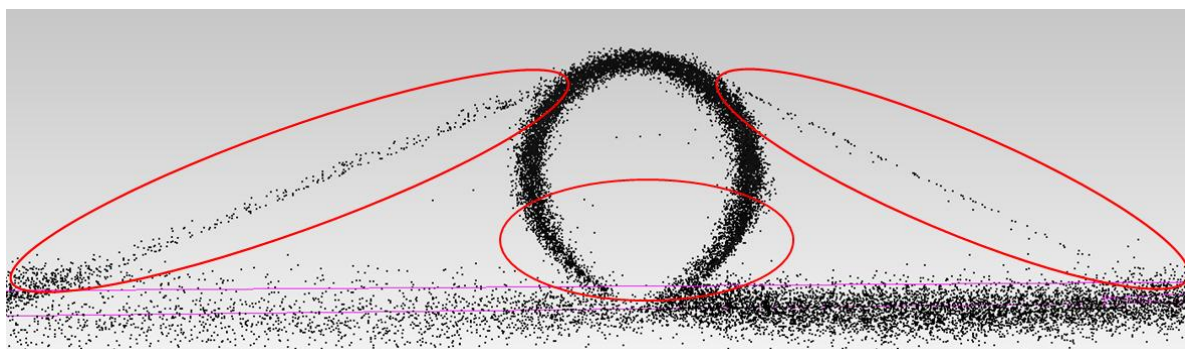


Рисунок 4.18 – Зоны краевого эффекта исследуемого трубопровода

Точки, входящие в зоны краевого эффекта, удаляются путем их выделения инструментами программного комплекса Spatial Analyzer. Стоит отметить, что если границы зон краевого эффекта, расположенных по краям от сканируемого трубопровода, достаточно четко прослеживаются, то место расположения начала зоны, находящейся в нижней части трубопровода, не так хорошо различимо.

В процессе лазерного сканирования магистральных трубопроводов предлагается установка сканера перед откосами траншеи над

трубопроводом, при этом величина сектора сканирования редко будет больше  $180^\circ$  ввиду геометрических параметров ремонтных траншей. Исходя из этого, зона краевого эффекта, расположенная в нижней части исследуемого трубопровода, ниже боковой его образующей.

2. Далее производилась обработка облака точек исследуемой трубы в программном комплексе Spatial Analyzer в порядке, описанном ранее для неизолированной упруго-изогнутой трубы.

Далее определяется минимальный размер сектора лазерного сканирования трубопровода. В качестве исследуемых величин углов сектора лазерного сканирования выбираем четыре величины от  $180^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом уменьшения угла равным  $30^\circ$ . Таким образом, полученное облако точек изолированной трубы последовательно уменьшается в соответствии с выбранными величинами углов сканируемого сектора.

Расположение исследуемых секторов лазерного сканирования представлено на рисунке 4.19.

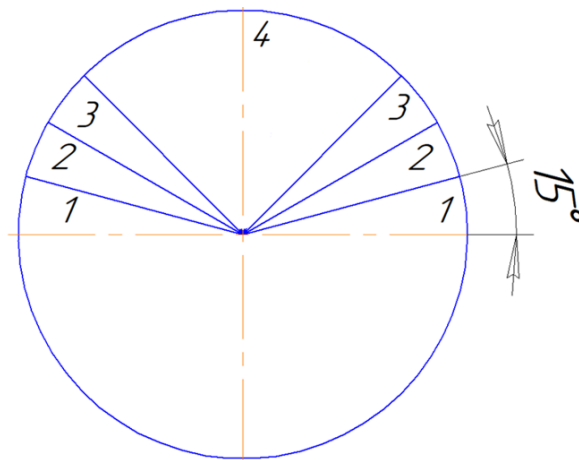


Рисунок 4.19 – Расположение исследуемых секторов лазерного сканирования

#### **4.2 Результаты экспериментальных исследований величин усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования по данным его лазерного сканирования**

В результате определения коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси упруго-изогнутой трубы на

основе облака точек ее лазерного сканирования и фотографий крестовых маркеров были получены коэффициенты, представленные в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Коэффициенты полиномов центральной оси трубы, полученные путем ее лазерного сканирования и фотографирования маркеров

Метод оценки	Коэффициенты полинома			
	$a$	$b$	$c$	$e$
Труба $l = 2,2$ м, $l_1 = 1,1$ м, $l_2 = 2,1$ м				
Сканирование	$-4,971 \cdot 10^{-5}$	$3,024 \cdot 10^{-3}$	$-1,841 \cdot 10^{-2}$	$-3,628 \cdot 10^{-5}$
Фото	$-4,950 \cdot 10^{-5}$	$3,119 \cdot 10^{-3}$	$-1,904 \cdot 10^{-2}$	$-3,746 \cdot 10^{-5}$
Труба $l = 2$ м, $l_1 = 1$ м, $l_2 = 1,9$ м				
Сканирование	$-4,780 \cdot 10^{-5}$	$2,974 \cdot 10^{-3}$	$-1,659 \cdot 10^{-2}$	$-3,751 \cdot 10^{-5}$
Фото	$-4,753 \cdot 10^{-5}$	$3,069 \cdot 10^{-3}$	$-1,716 \cdot 10^{-2}$	$-3,875 \cdot 10^{-5}$
Труба $l = 1,8$ м, $l_1 = 0,9$ м, $l_2 = 1,7$ м				
	$-4,580 \cdot 10^{-5}$	$-4,580 \cdot 10^{-5}$	$-4,580 \cdot 10^{-5}$	$-4,580 \cdot 10^{-5}$
	$-4,580 \cdot 10^{-5}$	$-4,580 \cdot 10^{-5}$	$-4,580 \cdot 10^{-5}$	$-4,580 \cdot 10^{-5}$
Труба $l = 1,6$ м, $l_1 = 0,8$ м, $l_2 = 1,5$ м				
	$-4,064 \cdot 10^{-5}$	$-4,064 \cdot 10^{-5}$	$-4,064 \cdot 10^{-5}$	$-4,064 \cdot 10^{-5}$
	$-3,976 \cdot 10^{-5}$	$-3,976 \cdot 10^{-5}$	$-3,976 \cdot 10^{-5}$	$-3,976 \cdot 10^{-5}$

Пример графиков прогиба трубы, полученных методами ее лазерного сканирования и фотосъемки маркеров, представлен на рисунке 4.20.

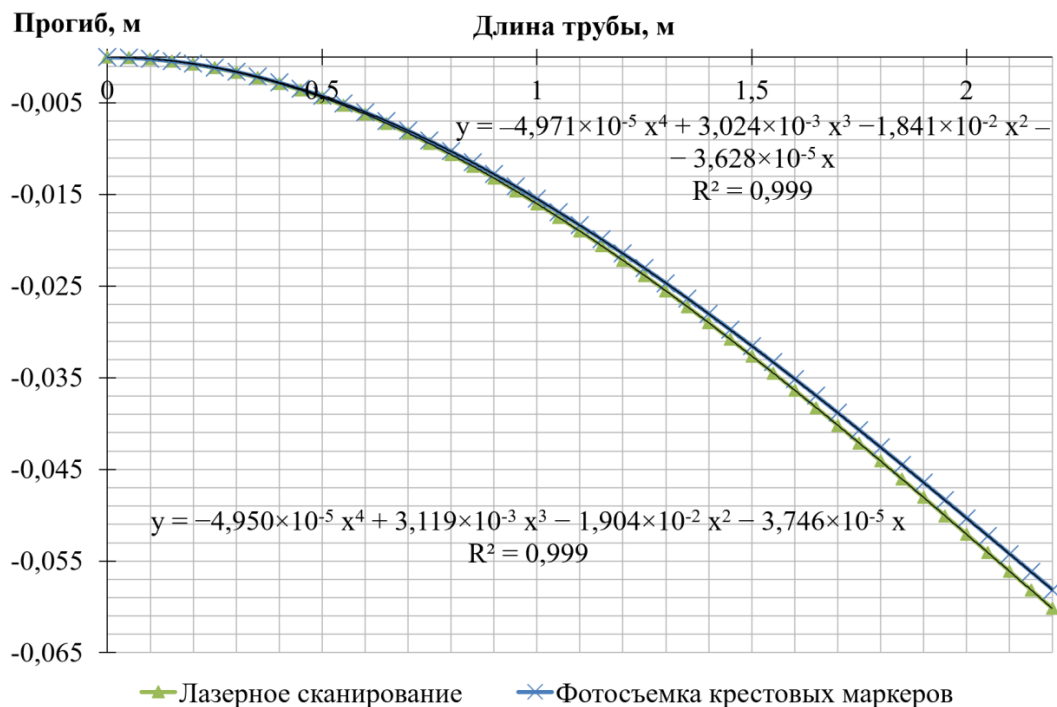


Рисунок 4.20 – Графики прогиба трубы длиной 2,2 м, полученные методами ее лазерного сканирования и фотосъемки крестовых маркеров



Рассчитанные по полученным коэффициентам полинома величины усилий при условии центрирования конца трубы до нулевой отметки по вертикальной оси представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Величины усилий для устранения смещения концов трубопровода и их центрирования, рассчитанные на основе полученных коэффициентов полиномов

Параметр	Величина, полученная по данным лазерного сканирования	Величина, полученная фотосъемкой крестовых маркеров	Относительные отклонения, %
Труба $l = 2,2$ м, $l_1 = 1,1$ м, $l_2 = 2,1$ м			
$X_1$ , Н	81,599	80,616	-1,219
$X_2$ , Н	-515,26	-509,92	-1,047
$P_1$ , Н	49,362	49,256	-0,215
$P_2$ , Н	14,925	14,94	0,100
Труба $l = 2$ м, $l_1 = 1$ м, $l_2 = 1,9$ м			
$X_1$ , Н	78,482	81,329	3,501
$X_2$ , Н	-487,508	-475,394	-2,548
$P_1$ , Н	45,546	45,41	-0,299
$P_2$ , Н	13,665	13,686	0,153
Труба $l = 1,8$ м, $l_1 = 0,9$ м, $l_2 = 1,7$ м			
$X_1$ , Н	95,42	93,85	-1,673
$X_2$ , Н	-524,429	-514,815	-1,867
$P_1$ , Н	43,911	43,798	-0,258
$P_2$ , Н	13,053	13,068	0,115
Труба $l = 1,6$ м, $l_1 = 0,8$ м, $l_2 = 1,5$ м			
$X_1$ , Н	119,277	115,092	-3,636
$X_2$ , Н	-605,153	-582,835	-3,829
$P_1$ , Н	33,894	34,201	0,898
$P_2$ , Н	11,684	11,715	0,265

В результате проведенного экспериментального исследования влияния неровностей изоляционного покрытия на результаты расчета усилий, необходимых для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования, получены абсолютные отклонения координат точек центральной оси изолированной трубы от неизолированной, представленные на рисунках 4.21 и 4.22.

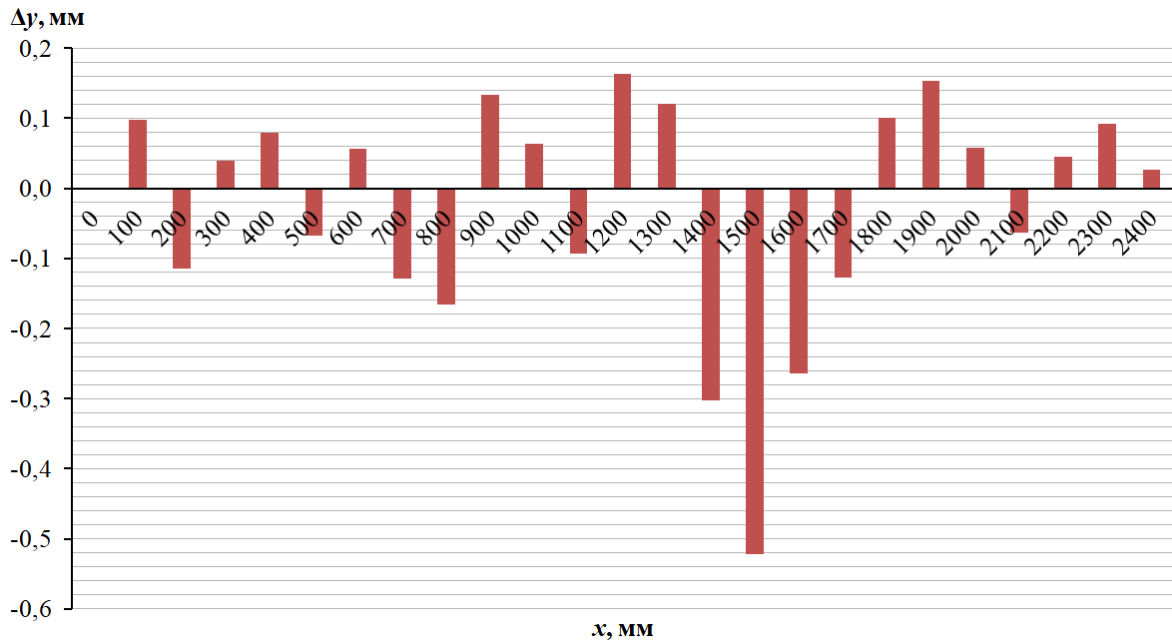


Рисунок 4.21 – Величины абсолютных отклонений  $\Delta y$  координат точек центральной оси трубы по оси  $Oy$  до и после ее изоляции

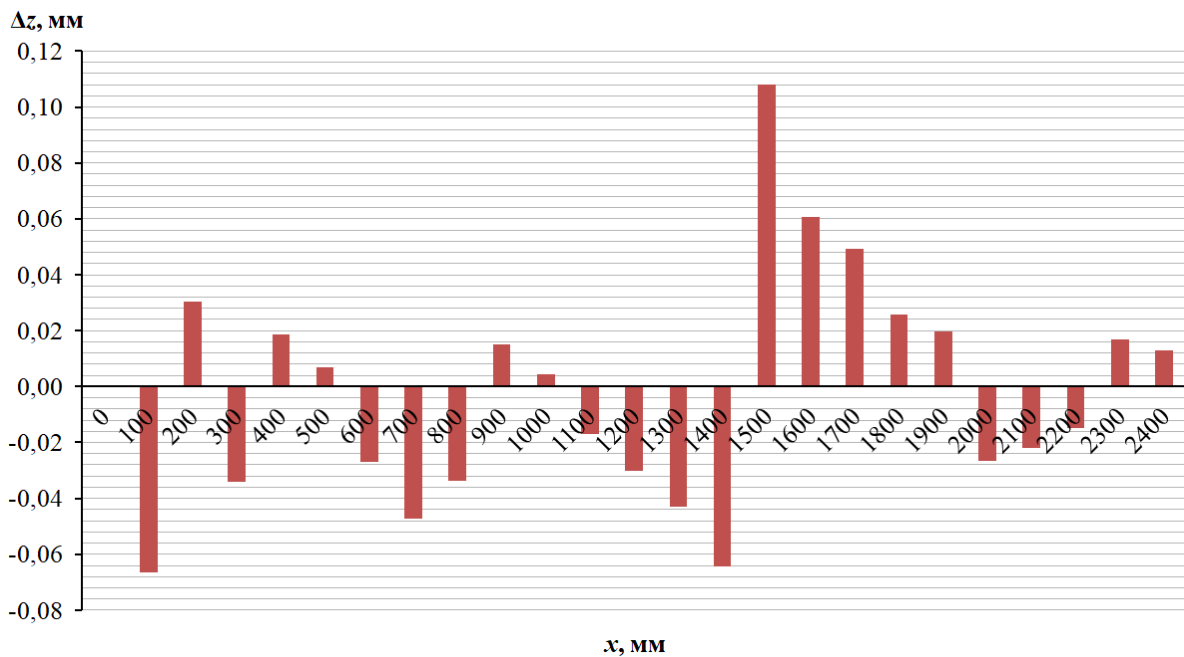


Рисунок 4.22 – Величины абсолютных отклонений  $\Delta z$  координат точек центральной оси трубы по оси  $Oz$  до и после ее изоляции

Исходя из полученных результатов, максимальная величина абсолютного отклонения координат точек центральной оси исследуемого трубопровода в результате его изоляции составила 0,522 мм. Эта величина наблюдается в районе самой крупной неровности изоляции, которая

локализована на участке от 1500 мм до 1600 мм вдоль трубопровода и отклоняется на 7 мм от поверхности изоляции, что составляет 0,14 от наружного диаметра трубопровода. Такое соотношение неровности изоляции к наружному диаметру трубопровода не наблюдается при эксплуатации магистральных трубопроводов, так как, например, в случае трубопровода диаметром 820 мм подобная неровность изоляции составила бы 115 мм, что существенно выше неровностей изоляционного покрытия, наблюдаемых в действительности.

В результате лазерного сканирования изолированной трубы с различными углами секторов сканирования абсолютные отклонения координат точек центральной оси трубы по осям  $Oy$  и  $Oz$  от координат точек неизолированной трубы представлены на рисунках 4.23 и 4.24.

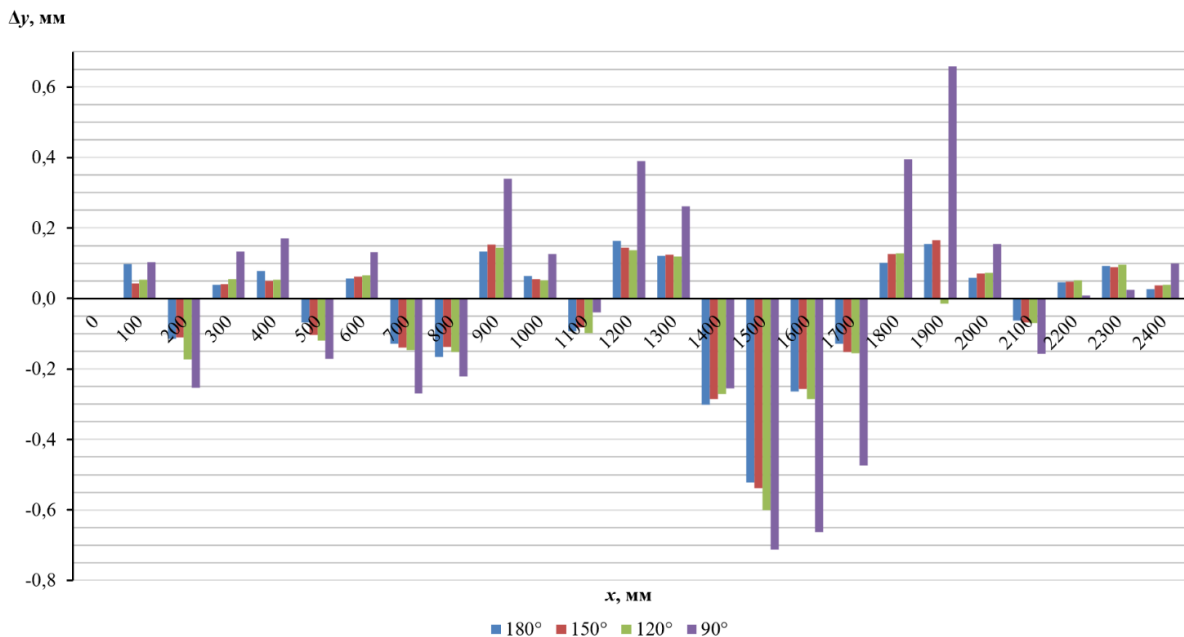


Рисунок 4.23 – Абсолютные отклонения по оси  $Oy$  координат точек центральной оси трубы после ее изоляции в зависимости от угла сектора лазерного сканирования

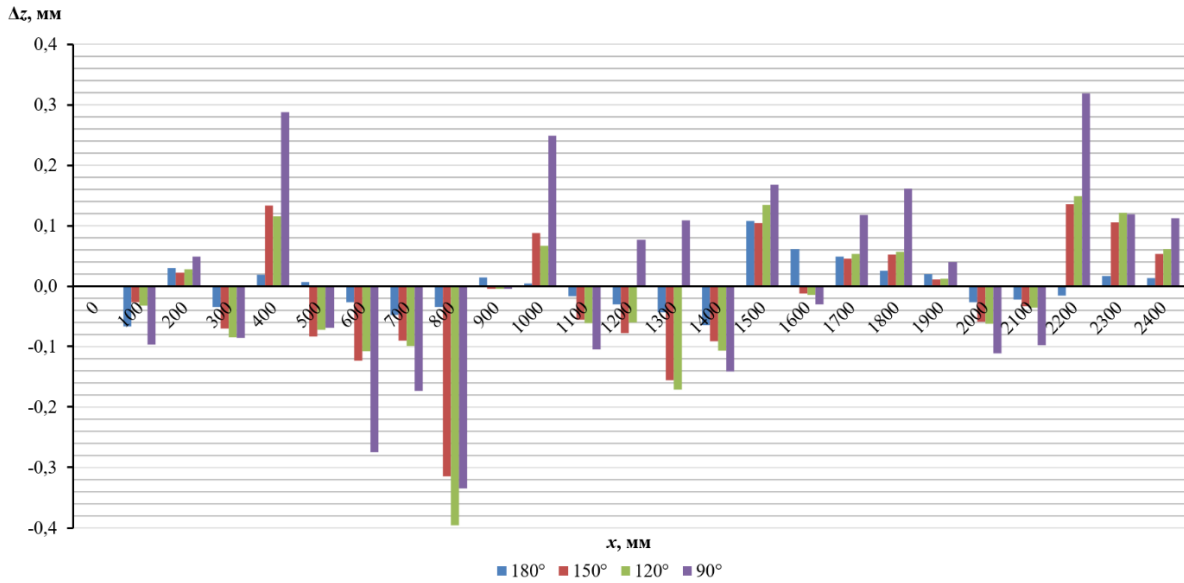


Рисунок 4.24 – Абсолютные отклонения по оси  $Oz$  координат точек центральной оси трубы после ее изоляции в зависимости от угла сектора лазерного сканирования

Далее для оценки степени влияния полученных абсолютных отклонений  $\Delta y$  и  $\Delta z$  центральных точек оси трубы после ее изоляции на рассчитанные усилия для устранения смещения конца трубы и его центрирования до нулевой отметки по вертикальной и горизонтальной осям используем ранее полученные путем фотографирования крестовых маркеров координаты центральной оси неизолированной упруго-изогнутой трубы длиной 2,2 м и суммируем их с полученными абсолютными отклонениями координат по обеим осям. После чего результирующие координаты аппроксимируются полиномом четвертой степени, на основе которого рассчитываются величины  $X_i$  и  $P_i$ .

Коэффициенты полиномов, описывающих изгиб центральной оси исследуемого трубопровода с учетом его изоляции при уменьшении угла сектора сканирования представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Коэффициенты полиномов, описывающих изгиб центральной оси исследуемой трубы с учетом ее изоляции при уменьшении угла сканируемого сектора

Угол сектора	Ось	Коэффициенты полинома			
		$a$	$b$	$c$	$e$
180°	$Oy$	$-4,963 \cdot 10^{-4}$	$3,056 \cdot 10^{-3}$	$-1,862 \cdot 10^{-2}$	$-3,668 \cdot 10^{-5}$
	$Oz$	$-4,958 \cdot 10^{-4}$	$3,081 \cdot 10^{-3}$	$-1,879 \cdot 10^{-2}$	$-3,699 \cdot 10^{-5}$
150°	$Oy$	$-4,950 \cdot 10^{-4}$	$3,119 \cdot 10^{-3}$	$-1,904 \cdot 10^{-2}$	$-3,746 \cdot 10^{-5}$
	$Oz$	$-4,947 \cdot 10^{-4}$	$3,132 \cdot 10^{-3}$	$-1,913 \cdot 10^{-2}$	$-3,762 \cdot 10^{-5}$
120°	$Oy$	$-4,943 \cdot 10^{-4}$	$3,151 \cdot 10^{-3}$	$-1,925 \cdot 10^{-2}$	$-3,785 \cdot 10^{-5}$
	$Oz$	$-4,933 \cdot 10^{-4}$	$3,196 \cdot 10^{-3}$	$-1,954 \cdot 10^{-2}$	$-3,840 \cdot 10^{-5}$
90°	$Oy$	$-4,851 \cdot 10^{-4}$	$3,576 \cdot 10^{-3}$	$-1,206 \cdot 10^{-2}$	$-3,310 \cdot 10^{-5}$
	$Oz$	$-5,089 \cdot 10^{-4}$	$2,479 \cdot 10^{-3}$	$-1,480 \cdot 10^{-2}$	$-2,954 \cdot 10^{-5}$

Результаты расчета величин  $X_i$  и  $P_i$ , прикладываемых к трубе длиной 2,2 м в сечениях с координатами  $l_1 = l/2$  и  $l_2 = l - 0,1$ , с учетом ее изоляции представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчета величин  $X_i$  и  $P_i$  с учетом изоляции исследуемой трубы

Труба без изоляции длиной $l = 2,2$ м				
Параметр	Величина			
$X_1, Н$	80,616			
$X_2, Н$	-509,92			
$P_1, Н$	49,256			
$P_2, Н$	14,94			
Угол сектора лазерного сканирования 180° после изоляции трубы				
Параметр	Величина с учетом $\Delta y$	Относительное отклонение $\delta y, \%$	Величина с учетом $\Delta z$	Относительное отклонение $\delta z, \%$
$X_1, Н$	79,618	-1,253	81,806	1,455
$X_2, Н$	-503,138	-1,348	-518,523	1,659
$P_1, Н$	50,699	2,846	49,320	0,130
$P_2, Н$	15,418	3,100	14,931	-0,060
Угол сектора лазерного сканирования 150° после изоляции трубы				
Параметр	Величина с учетом $\Delta y$	Относительное отклонение $\delta y, \%$	Величина с учетом $\Delta z$	Относительное отклонение $\delta z, \%$
$X_1, Н$	82,599	2,401	82,864	2,713
$X_2, Н$	-524,26	2,735	-526,174	3,089
$P_1, Н$	49,362	0,215	49,376	0,243
$P_2, Н$	14,925	-0,101	14,923	-0,114

## Продолжение таблицы 4.4

Угол сектора лазерного сканирования 120° после изоляции трубы				
Параметр	Величина с учетом $\Delta y$	Относительное отклонение $\delta y$ , %	Величина с учетом $\Delta z$	Относительное отклонение $\delta z$ , %
$X_1$ , Н	83,261	3,177	84,186	4,241
$X_2$ , Н	-529,042	3,614	-535,735	4,819
$P_1$ , Н	49,398	0,287	49,448	0,388
$P_2$ , Н	14,92	-0,134	14,913	-0,181
Угол сектора лазерного сканирования 90° после изоляции трубы				
Параметр	Величина с учетом $\Delta y$	Относительное отклонение $\delta y$ , %	Величина с учетом $\Delta z$	Относительное отклонение $\delta z$ , %
$X_1$ , Н	92,121	12,489	69,284	-16,356
$X_2$ , Н	-593,103	14,025	-427,688	-19,227
$P_1$ , Н	49,875	1,241	48,644	-1,258
$P_2$ , Н	14,851	-0,599	15,028	0,586

По результатам выполненных расчетов можно сделать вывод, что при использовании предлагаемого метода оценки коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода путем обработки облака точек его лазерного сканирования, величина угла сканируемого сектора должна составлять более 120°, что обеспечит достаточно точные результаты расчета величин усилий  $X_i$  и  $P_i$  с относительным отклонением их менее 5% от результатов расчета для полностью отсканированного неизолированного трубопровода.

Возможность обеспечения полученной минимальной величины угла сектора лазерного сканирования с учетом параметров ремонтных траншей, зависящих от типа грунта, в котором проложен трубопровод, в соответствии с РД 153-39.4-067-04, подтверждается рисунками 4.25 и 4.26 [85].

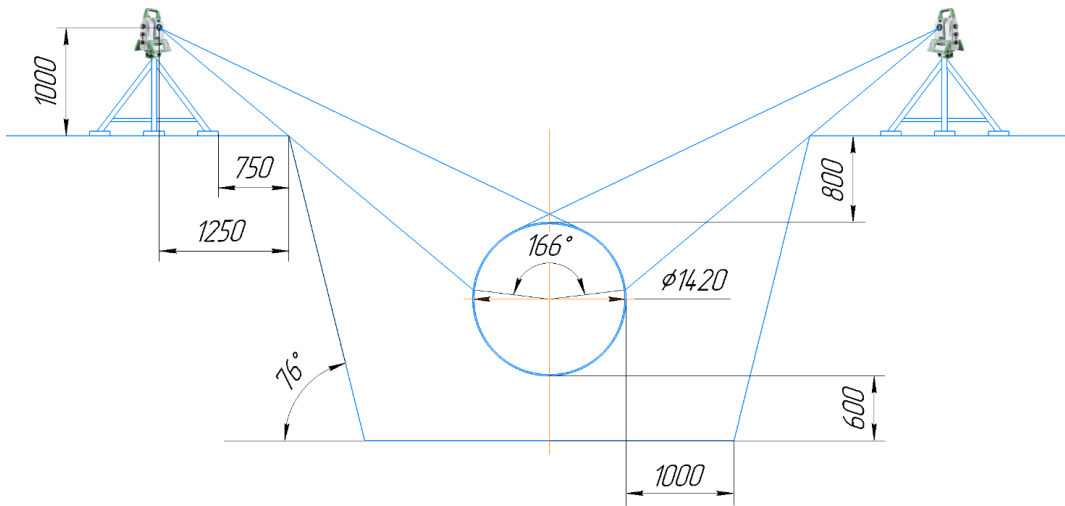


Рисунок 4.25 – Величина угла сектора лазерного сканирования при проведении ремонта магистрального трубопровода, расположенного в глинистом грунте

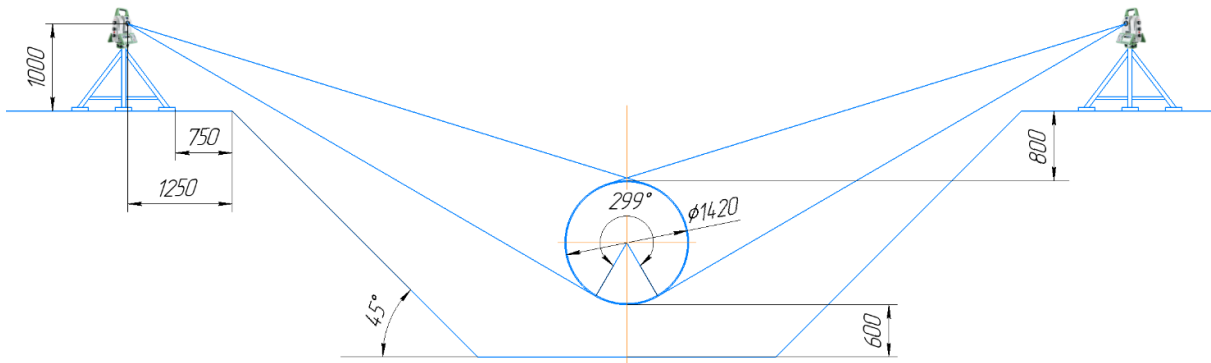


Рисунок 4.26 – Величина угла сектора лазерного сканирования при проведении ремонта магистрального трубопровода, расположенного в песчаном и гравийном грунте

Минимальная величина угла сканируемого сектора в полной мере может быть обеспечена при ремонте магистральных трубопроводов. В случае ремонта магистрального трубопровода наружным диаметром 1420 мм в песчаном и гравийном грунте величина угла сектора лазерного сканирования составила  $166^\circ$ . Для случая ремонта в глинистом грунте данная величина составляет  $299^\circ$ .

#### 4.3 Выводы по главе 4

1. Разработанный метод оценки коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода на основе облака точек его лазерного сканирования,

позволяет рассчитать усилия для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования с относительной погрешностью 5% в сравнении с результатами расчетов на основе координат точек центральной оси, полученных путем фотографирования крестовых маркеров, наклеенных на боковую образующую трубопровода;

2. Неровности изоляционного покрытия трубопровода не оказывают существенного влияния на результаты расчета усилий для устранения резкого смещения концов трубопровода и их центрирования на основе облака точек его лазерного сканирования;

3. Определение усилий для устранения смещения концов трубопровода и их центрирования на основе облака точек его лазерного сканирования с относительной погрешностью до 5% обеспечивается при угле сканируемого сектора не менее  $120^\circ$ , который в полной мере соблюдается при ремонте магистральных трубопроводов.



## ГЛАВА 5 АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО СПОСОБА РЕМОНТА

### 5.1 Методика расчета показателей экономической эффективности применения предлагаемых технологических решений

Целью расчета является оценка показателей технико-экономической эффективности применения разработанного способа ремонта магистральных трубопроводов.

Расчет будет осуществляться, исходя из сравнения эксплуатационных затрат на производство работ с помощью предлагаемого способа ремонта с применением устройств фиксирования и центрирования с затратами на производство работ используемым в настоящее время способом с применением трубоукладчиков, а также исходя из условия срока окупаемости лазерного сканера и предлагаемых устройств равного двум годам.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета показателей экономической эффективности разработанного способа ремонта

Параметр	Величина
Стоимость трубоукладчика, руб.	30 000 000
Количество трубоукладчиков, шт.	2
Срок службы трубоукладчика, лет	20
Количество работников в бригаде, чел.	13
Средняя заработная плата работника, руб./ч	500
Продолжительность работ по центрированию концов трубопровода и их сварке, ч	5
Расход топлива при погрузочно-разгрузочных операциях, л/ч	15
Стоимость разрешения на транспортировку одного трубоукладчика в одну сторону, руб.	50 000
Стоимость дизельного топлива, руб./л	60
Расход топлива автокрана, л/ч	35
Расход топлива тягача, л/ч	35
Расстояние до места производства ремонтных работ, км	50

При использовании трубоукладчиков состав рабочей бригады следующий (13 человек):

- трубопроводчики линейные – 6 чел.;
- машинист экскаватора – 1 чел.;
- водитель тягача – 1 чел.;
- машинист автокрана – 1 чел.;
- электромонтер – 1 чел.;
- машинист трубоукладчика – 2 чел.;
- дефектоскопист – 1 чел.

В случае применения устройств фиксирования и центрирования состав бригады будет меньше на три человека (нет необходимости в водителе тягача и двух машинистах трубоукладчиков), то есть 10 человек.

Для оценки экономической эффективности применения разработанного способа ремонта необходимо рассчитать чистый дисконтированный доход проекта ( $NPV$ ) и индекс доходности инвестиций ( $PI$ ) за весь срок эксплуатации устройств фиксирования и центрирования.

Величина  $NPV$  характеризует эффективность вложения в инвестиционный проект и равна величине денежного потока в течение срока реализации проекта, приведенной к текущей стоимости. Приведение денежных средств к концу срока реализации проекта к текущей их стоимости на сегодняшний день называется дисконтированием.

Проект считается экономически эффективным, если значение  $NPV$  к концу срока реализации проекта больше нуля.

Сроком окупаемости инвестиционного проекта является период времени, необходимый для того, чтобы доходы, получаемые с реализации проекта, покрыли затраты на инвестиции, то есть значение срока реализации проекта, после которого значение  $NPV$  станет больше или равно нулю.

$NPV$  будет рассчитываться, исходя из получения прибыли за счет сокращения эксплуатационных затрат на проведение одной вырезки с использованием предлагаемых устройств взамен трубоукладчиков. При

этом удовлетворяющей сроку окупаемости стоимостью устройства будет являться такая его стоимость, при которой  $NPV$  на второй год реализации проекта превысит нулевое значение.

Индекс доходности инвестиций  $PI$  вычисляется по формуле (5.1). Эффективным проект считается при значении  $PI$  больше 1.

$$PI = \frac{NPV}{IC} \quad (5.1)$$

$NPV$  рассчитывается по следующей формуле (5.2):

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{CI_t}{(1+r)^t} - IC, \quad (5.2)$$

где  $CF$  – поток денежных средств, тыс. руб.;  $CI$  – доходы за счет экономии эксплуатационных затрат, тыс. руб.;  $IC$  – первоначальные капитальные затраты на покупку устройств фиксирования и центрирования концов трубопровода, тыс. руб.;  $t$  – порядковый номер расчетного года;  $r$  – ставка дисконтирования.

Ставка дисконтирования в соответствии с Постановлением Правительства Российской от 22 ноября 1997 г. № 1470 рассчитывается по формуле (6.3) [82]:

$$r = R_w + R_p, \quad (6.3)$$

где  $R_w$  – ставка дисконтирования без учета риска проекта, дол. ед.;  $R_p$  – поправка на риск проекта, дол. ед.

Ставка дисконтирования без учета риска проекта рассчитывается по формуле (5.4):

$$R_w = \frac{1 + \frac{R_b}{100}}{1 + \frac{i}{100}} - 1, \quad (5.4)$$

где  $R_b$  – ставка рефинансирования Банка России, дол. ед.;  $i$  – темп инфляции на текущий год, дол. ед.

## 5.2 Расчет показателей экономической эффективности применения предлагаемых технологических решений

Значение ставки рефинансирования Банка России ( $R_b$ ) приравнивается к значению ключевой ставки Банка России, определенной на соответствующую дату. Ключевая ставка Банка России составляет 16% [50].

Объявленный Правительством Российской Федерации темп инфляции ( $i$ ) на 2024 год составляет 4,5% [51].

Тогда безрисковая ставка дисконтирования будет равна (5.5):

$$R_w = \frac{1 + \frac{16}{100}}{1 + \frac{4,5}{100}} - 1 = 11\% \quad (5.5)$$

Исходя из данных Постановления Правительства Российской от 22 ноября 1997 г. № 1470, поправка на риск проекта ( $R_p$ ) в случае финансовых вложений в исследования и инновации (очень высокий риск) составляет 19% [82].

В результате ставка дисконтирования будет равна (5.6):

$$r = 11 + 19 = 30\% \quad (5.6)$$

Результаты расчета  $NPV$  представлены в таблицах 5.2, 5.3 и на рисунке 5.1.

Таблица 5.2 – Эффект экономии затрат на проведение ремонтных работ с вырезкой дефектного участка за счет применения предлагаемой технологии ремонта и устройств фиксирования и центрирования концов трубопровода

Показатель	Единицы измерения	Оборудование для ремонтных работ	
		Два трубоукладчика	Два предлагаемых устройства
Капитальные вложения (стоимость оборудования)	тыс. руб.	60 000	11 140,566
Эксплуатационные затраты	тыс. руб./год	11 020,600	2 834,274

## Продолжение таблицы 5.2

В том числе:			
- заработная плата	тыс. руб./ год	1300,00	1000,00
- отчисления на социальные нужды (30,2% от заработной платы)	тыс. руб./ год	392,60	302,00
- Затраты на топливо	тыс. руб./ год	528,00	84,00
- оформление разрешения на перевоз негабаритной техники	тыс. руб./ год	4000,00	0,00
- амортизация (при сроке службы предлагаемых устройств 10 лет, сроке службе трубоукладчика 20 лет)	тыс. руб./ год	3000,00	1114,057
- затраты на ремонт (3% от стоимости оборудования в год)	тыс. руб./ год	1800,00	334,217
Экономия эксплуатационных затрат	тыс. руб./ год	8186,326	

В результате расчета максимальная величина капитальных затрат на приобретение оборудования для реализации разработанного способа ремонта с учетом срока окупаемости оборудования равного двум годам составит 11 140,57 тыс. руб. В полученную сумму входят стоимость лазерного сканера и устройств фиксирования и центрирования. При условии стоимости лазерного сканера 4 млн руб., стоимость двух устройств фиксирования и центрирования должна составлять 7 140,57 тыс. руб. [64]. При этом чистый дисконтированный доход к концу срока их эксплуатации составит 14 164,48 тыс. руб.

Также рассчитаем индекс доходности инвестиций по формуле (5.7):

$$PI = \frac{14164,48}{11140,57} = 1,27 \quad (5.7)$$

На каждый рубль вложенных средств доход составит 1,27 рубля, что говорит об экономической целесообразности применения предлагаемого способа ремонта.

Таблица 5.3 – Расчет NPV использования разработанного способа ремонта

Параметр	Единицы измерения	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Снижение эксплуатационных затрат	тыс. руб.	0,00	8186,326	8186,326	8186,326	8186,326	8186,326	8186,326	8186,326	8186,326	8186,326	8186,326
Капитальные затраты на устройство	тыс. руб.	11140,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Чистый поток денежных средств	тыс. руб.	-11140,57	8186,33	8186,33	8186,33	8186,33	8186,33	8186,33	8186,33	8186,33	8186,33	8186,33
Накопленный поток денежных средств	тыс. руб.	-11140,57	-2954,24	5232,09	13418,41	21604,74	29791,07	37977,39	46163,72	54350,05	62536,37	70722,70
Коэффициент дисконтирования	дол. ед.	1,00	0,77	0,59	0,46	0,35	0,27	0,21	0,16	0,12	0,09	0,07
Дисконтированный денежный поток	тыс. руб.	-11140,57	6296,94	4843,62	3725,73	2865,84	2204,41	1695,64	1304,29	1003,26	771,71	593,60
Накопленный дисконтированный поток денежных средств	тыс. руб.	-11140,57	-4843,62	0,000	3725,73	6591,57	8795,98	10491,61	11795,90	12799,16	13570,88	14164,48

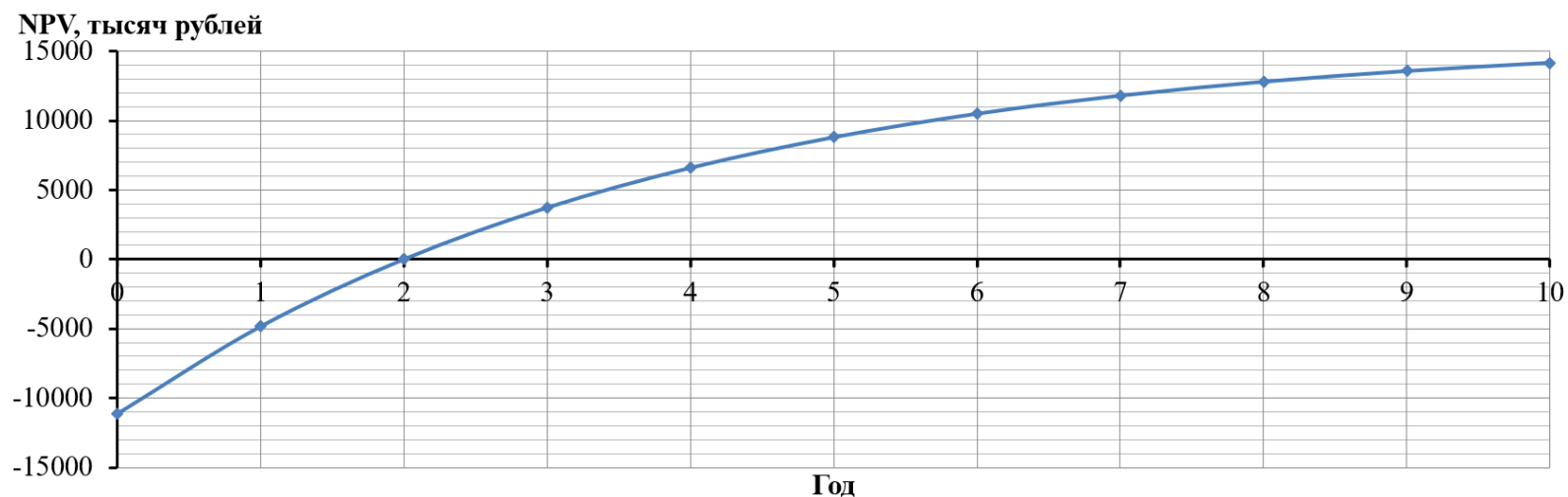


Рисунок 5.1 – График изменения чистого дисконтированного дохода при применении разработанного способа ремонта

Снижение расходов на проведение одного ремонта с вырезкой дефектного участка трубопровода по статьям затрат, связанных с применением трубокладчиков, при замене их предлагаемыми устройствами представлено на рисунке 5.2.

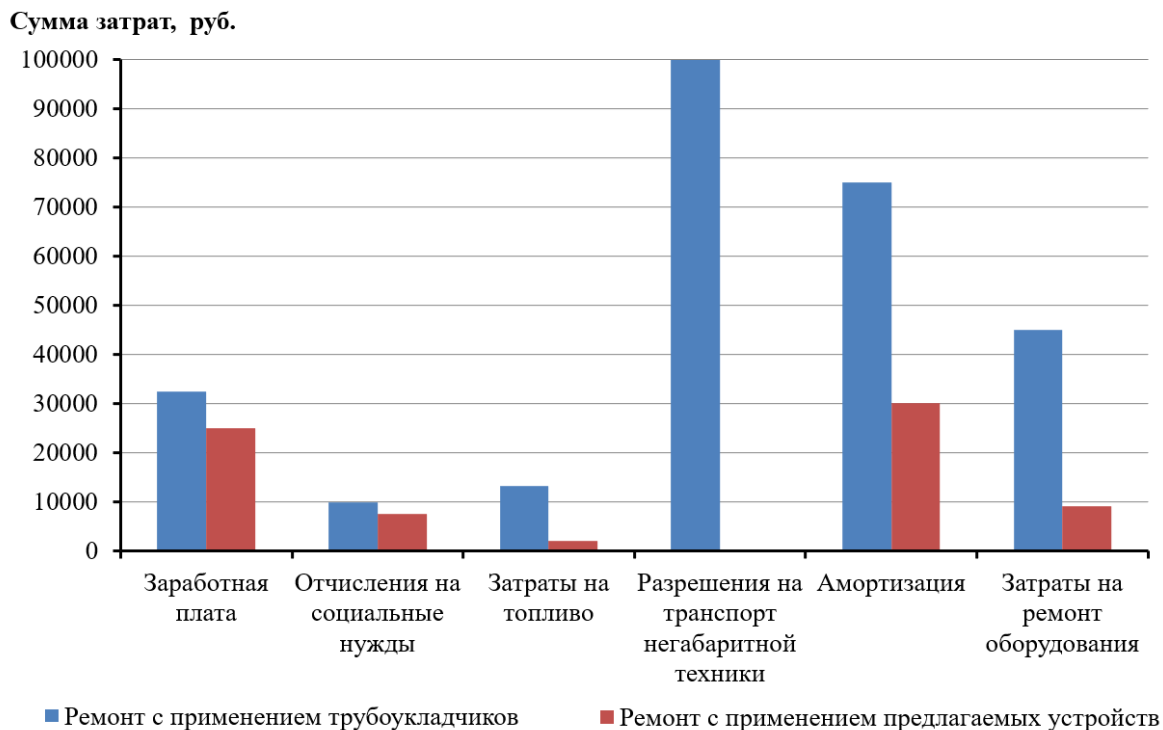


Рисунок 5.2 – Сравнение расходов на проведение одного ремонта по статьям затрат

Затраты на проведение ремонта магистрального трубопровода при использовании двух устройств фиксирования и центрирования в 3,73 раза ниже, чем при использовании двух трубокладчиков. В случае применения четырех устройств взамен четырех трубокладчиков затраты на проведение ремонта, связанные с использованием трубокладчиков, снижаются в 6,93 раза.

### 5.3 Выводы по главе 5

1. В результате расчета максимальная величина капитальных затрат на приобретение оборудования для реализации разработанного способа ремонта с учетом срока окупаемости оборудования равного двум годам составит 11 140,57 тыс. руб. В полученную сумму входят стоимость лазерного сканера и устройств фиксирования и центрирования. При условии

стоимости лазерного сканера 4 млн руб., стоимость двух устройств фиксирования и центрирования должна составлять 7 140,57 тыс. руб. При этом чистый дисконтированный доход к концу срока их эксплуатации составит 14 164,48 тыс. руб.

2. На основе результатов технико-экономической оценки подтверждена экономическая целесообразность применения разработанного способа ремонта магистральных трубопроводов, что обеспечивается за счет годовой экономии финансовых затрат на применение в ходе ремонтных работ трубоукладчиков равной 8,1 млн руб. при 40 ремонтах в год.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной научно-технической задачи обеспечения безопасного процесса вырезки дефектного участка магистрального трубопровода путем приложения к нему рассчитанных величин усилий, удерживающих его концы от резкого смещения при разрезании трубопровода.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Анализ применяемых способов ремонта магистральных трубопроводов показал, что наиболее применяемым из них является вырезка дефектного участка и замена его на новый. При этом вопросы обеспечения безопасного процесса вырезки недостаточно исследованы в части устранения резкого смещения концов трубопровода, что приводит к нарушениям техники безопасности в процессе ремонта;

2. Разработаны схема конструкции устройства для фиксирования и центрирования концов трубопровода в процессе ремонта и способ ремонта магистральных трубопроводов с вырезкой дефектных участков с применением разработанного устройства;

3. Разработана математическая модель для расчета усилий, необходимых для устранения резкого смещения концов трубопровода при его разрезании и их центрирования перед приваркой нового участка, с учетом коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси ремонтируемого участка трубопровода;

4. Разработан метод оценки коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода путем использования координат облака точек его лазерного сканирования и позволяющего при угле сканируемого сектора трубопровода не менее  $120^\circ$  и наличии неровностей его изоляционного покрытия оценить величину усилий, необходимых для центрирования его концов и устранения их резкого смещения, с относительной погрешностью до 5%.

5. На основе результатов технико-экономической оценки подтверждена экономическая целесообразность применения разработанного способа ремонта магистральных трубопроводов, что обеспечивается за счет годовой экономии финансовых затрат на применение в ходе ремонтных работ трубоукладчиков равной 8,1 млн руб. при 40 ремонтах в год.

6. В качестве дальнейшего развития исследований по теме диссертации важно довести предлагаемые технологические решения до стадии ОКР (опытно-конструкторских работ) и промышленной апробации, а также разработать технологические регламенты их применения в процессе ремонта магистральных трубопроводов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абдрахманов, А.Ж. Повышение эффективности технологии замены дефектного участка магистрального трубопровода : специальность 25.00.19 "Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Абдрахманов Аскын Жаилевич. – Уфа, 2004. – 147 с.
2. Абдрахманов, Д.А. Виды и основные принципы работы лазерного сканирования / Д.А. Абдрахманов // Интернаука. – 2020. – № 4-1(133). – С. 11-13.
3. Аврунев, Е.И. Технологические решения в области обеспечения геопространственной информации о магистральных трубопроводах и объектах их инфраструктуры / Е.И. Аврунев, Г.А. Уставич, А.О. Грекова [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 7. – С. 188-201. – DOI 10.18799/24131830/2020/7/2729.
4. Агиней, Р.В. Совершенствование метода оценки изгибных напряжений в стенке подземного трубопровода / Р.В. Агиней, А.А. Фирстов // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – С. 744-754. – DOI 10.31897/PMI.2022.64.
5. Андропов, А.В. Повышение точности позиционирования внутритрубных снарядов с использованием данных ГЛОНАСС/GPS / А.В. Андропов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2006. – № 5(12). – С. 3-7.
6. Аскарлов, Р.М. О технологии выявления участков трубопроводов с изгибными напряжениями при пересечении ими геодинамических зон / Р.М. Аскарлов, С.В. Китаев, И.М. Исламов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 5. – С. 18-25. – DOI 10.18799/24131830/2019/5/254.
7. Аскарлов, Р.М. Патент № 2740329 С1 Российская Федерация, МПК F16L 1/024, F16L 1/028. Способ ремонта потенциально опасного

участка трубопровода : № 2020110291 : заявл. 10.03.2020 : опубл. 13.01.2021 / Р. М. Аскарлов, Г. С. Шарнина, М. Б. Тагиров, Р. Г. Аскарлов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный нефтяной технический университет".

8. Аскарлов, Р.М. Ремонт магистральных трубопроводов с ненормативными радиусами изгиба оси трубы / Р.М. Аскарлов, М.В. Чучкалов, М.Б. Тагиров [и др.] // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2019. – № 12(96). – С. 72-77.

9. Баборыкин, М.Ю. Новые подходы в мониторинге опасных геологических процессов на трубопроводах / М.Ю. Баборыкин, Е.В. Жидиляева // Геоинфо. – 2022. – № 9. – С. 36-41.

10. Баборыкин, М.Ю. Патент на полезную модель № 173296 U1 Российская Федерация, МПК F17D 5/00. устройство определения планово-высотного положения трубопровода : № 2017108820 : заявл. 16.03.2017 : опубл. 21.08.2017 / М.Ю. Баборыкин.

11. Бахтизин, Р.Н. Оценка влияния внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода / Р.Н. Бахтизин, Р.М. Зарипов, Г.Е. Коробков, Р.Б. Масалимов // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 160-168. – DOI 10.31897/PMI.2020.2.160.

12. Бахтизин, Р.Н. Патент № 2690997 C1 Российская Федерация, МПК F16L 1/028, F16L 1/10. Способ замены дефектного участка трубопровода : № 2018117191 : заявл. 08.05.2018 : опубл. 07.06.2019 / Р.Н. Бахтизин, Н.К. Криони, А.Д. Мингажев [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "РобоТритПайп".

13. Бурков, П.В. Исследование напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов проложенных в условиях вечной мерзлоты / П.В. Бурков, С.П. Буркова, О.В. Ключ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S2. – С. 184-189.

14. Буторин, А.И. Обработка результатов инклинометрических измерений основных параметров напряженно-деформированного состояния магистральных газонефтепроводов методом сплайнов / А.И. Буторин, А.В. Сальников // Булатовские чтения. – 2020. – Т. 4. – С. 29-32.

15. Варшицкий, В.М. Упругопластический изгиб трубопровода при комбинированном нагружении / В.М. Варшицкий, Е.П. Студенов, О.А. Козырев, Э.Н. Фигаров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 372-377. – DOI 10.28999/2541-9595-2021-11-4-372-377.

16. Варшицкий, В.М. Методика определения технологических параметров ремонта трубопровода с ненормативной кривизной / В. М. Варшицкий, И. Б. Лебеденко, Э. Н. Фигаров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 10, № 1. – С. 17-21. – DOI 10.28999/2541-9595-2020-10-1-17-21.

17. Варшицкий, В.М. Определение параметров ремонта трубопровода с начальной кривизной / В.М, Варшицкий, И.Б. Лебеденко, Э.Н. Фигаров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11. – №. 1. – С. 70-77.

18. Васин, Е.С. Развитие аналитического этапа диагностирования для повышения эффективности внутритрубной диагностики магистральных газопроводов / Е.С. Васин, И.И. Велиюлин // Территория Нефтегаз. – 2015. – № 2. – С. 56-62.

19. ВРД 39-1.10-026-2001 Методика оценки фактического положения и состояния подземных трубопроводов. – Введ. с 29.01.2001. [Текст] – М.: ВНИИГАЗ, 2001. – 62 с.

20. Вялышев, А.И. Волоконно-оптические датчики для контроля параметров состояния объектов и окружающей среды в задачах мониторинга / А.И. Вялышев, В.М. Добров, А.А. Долгов [и др.] // Природообустройство. – 2014. – № 3. – С. 32-37.

21. Гильмутдинов, Н.Р. Патент № 2529972 С2 Российская Федерация, МПК F16L 1/024. Способ вырезки участка трубопровода : № 2012152013/06 : заявл. 05.12.2012 : опубл. 10.10.2014 / Н.Р. Гильмутдинов, М.Н. Голубев ; заявитель Открытое акционерное общество "Урало-Сибирские магистральные нефтепроводы им. Д.А. Черняева" (ОАО "Уралсибнефтепровод").

22. Годжаманов, М.Г. Исследование погрешности рефракции лазерных сканеров / М.Г. Годжаманов, С.Б. Вердиев // Маркшейдерия и недропользование. – 2020. – № 1(105). – С. 48-50.

23. Горина, А.В. Использование лазерного сканирования для ГИС / А.В. Горина, М.Б. Реджепов // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). – 2020. – № 1(10). – С. 102-108.

24. Горлов, Н.И. Классификация и область применения волоконно-оптических датчиков на принципе рассеяния Мандельштама-Бриллюэна / Н.И. Горлов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023) : Сборник научных статей. XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. В 4 т., Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 2023 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2023. – С. 365-369.

25. Горлов, Н.И. Область применения волоконно-оптических датчиков на принципе бриллюэновского рассеяния / Н.И. Горлов, Т.Н. Шайгараева // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты : Сборник трудов Национальной научно-практической конференции, Москва, 10–11 ноября 2022 года / Под редакцией С.У. Увайсова. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2022. – С. 400-404.

26. Гура, Д.А. Устройство и принцип работы наземного лазерного сканера на примере Leica Scanstation C10 / Д.А. Гура, Р.А. Дьяченко, А.В. Андрющенко [и др.] // Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского

: Сборник научных статей XIII Международной научно-практической конференции, Краснодар, 21–22 декабря 2022 года. – Краснодар: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова» Министерства обороны Российской Федерации, 2023. – С. 357-361.

27. Дамрин, А.Г. Особенности лазерного сканирования в топографо-геодезических работах / А.Г. Дамрин, А.Р. Силина // Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и экологической безопасности : материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Оренбург, 25–26 ноября 2021 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2021. – С. 362-366.

28. Дамрин, А.Г. Преимущества лазерного сканирования при инженерно-геодезических изысканиях / А.Г. Дамрин // Геодезия и кадастры: производство и образование. –2021. – С. 16-20.

29. Джемилев, Э.Р. Повышение эффективности процесса ремонтных работ с вырезкой дефектных участков магистральных нефте- и газопроводов / Э. Р. Джемилев // Актуальные проблемы недропользования : тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С. 174-176.

30. Джемилёв, Э.Р. Разработка технологии и устройства для ремонта магистральных трубопроводов с вырезанием их дефектных участков / Э.Р. Джемилев, И.А. Шаммазов, Д.И. Сидоркин [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 10. – С. 78-82. – DOI 10.24887/0028-2448-2022-10-78-82.

31. Джемилёв, Э.Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662609 Российская Федерация. Программа для расчета эксплуатационных нагрузок на устройства фиксирования и центрирования концов трубопровода при его ремонте с вырезкой

дефектного участка : № 2023617331 : заявл. 19.04.2023 : опубл. 09.06.2023 / Э.Р. Джемилев, Д.И. Сидоркин, К.Е. Ратников ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

32. Долгополов, Д.В. Анализ точности исходных данных, используемых при моделировании рельефа и профиля трассы магистральных трубопроводов / Д.В. Долгополов, Е.И. Аврунев, В.А. Мелкий [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 4. – С. 168-180. – DOI 10.18799/24131830/2022/4/3454.

33. Долгополов, Д.В. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте / Д.В. Долгополов, М.Ю. Баборыкин, Е.В. Жидиляева, В.А. Мелкий // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2(52). – С. 25-34. – DOI 10.25714/MNT.2022.52.003.

34. Егоров, И.А. Технология мобильного лазерного сканирования / И.А. Егоров, В.И. Барихин, Л.Г. Говердовская // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – № 61-15. – С. 66-69. – DOI 10.18411/lj-05-2020-346.

35. Егорова, Т.Р. Прогнозирование температурного взаимодействия подземного нефтепровода и многолетнемерзлых грунтов / Т.Р. Егорова, В.Г. Кычкина, А.Е. Колесов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 6-1(120). – С. 124-130. – DOI 10.23670/IRJ.2022.120.6.018.

36. Захаров, А.А. Патент № 2739869 С1 Российская Федерация, МПК G01L 1/25, F17D 5/00. способ определения фактических напряжений изгиба трубопровода : № 2020121364 : заявл. 26.06.2020 : опубл. 29.12.2020 / А.А. Захаров, Т.И. Кузнецов, А.И. Барышев [и др.] ; заявитель Публичное акционерное общество "Транснефть" (ПАО "Транснефть"), Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта" (ООО "НИИ Транснефть"), Общество с



ограниченной ответственностью "Транснефть - Восток" (ООО "Транснефть - Восток").

37. Зорин, А.Е. Патент № 2747385 С1 Российская Федерация, МПК F17D 5/00. Способ определения пространственного положения трубопровода : № 2020135740 : заявл. 30.10.2020 : опубл. 04.05.2021 / А.Е. Зорин.

38. Игнатик, А.А. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния трубы при изгибе тензорезистивным и инклинометрическим методами / А.А. Игнатик // Территория Нефтегаз. – 2022. – № 5-6. – С. 30-40.

39. Изотова, Е.А. Разработка методов проектирования подземных газопроводов на сложных участках / Е.А. Изотова // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2020. – № 4(43). – С. 295-299.

40. Инструкция по определению фактического напряженно-деформированного состояния по данным геодезической съемки участков газопроводов, расположенных на территориях с опасными геодинамическими процессами, и оценки их работоспособности. М.: ВНИИГАЗ, 2003. 37 с.

41. Исламов, Р.Р. Совершенствование системы мониторинга технического состояния протяженных участков магистральных нефтегазопроводов применением волоконно-оптических сенсоров деформации : специальность 25.00.19 "Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Исламов Рустэм Рильевич. – Ухта, 2018. – 168 с.

42. Исраилов, М.Ш. Постановки и решения задач о совместном движении подземного трубопровода и грунта при произвольном угле падения сейсмической волны / М.Ш. Исраилов, С.С. Даурбеков, М.Р.Б. Хадисов // Миллионщиков-2020 : Материалы III Всероссийской научно-

практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова», Грозный, 20–22 сентября 2020 года. – Грозный: ООО "Спектр", 2020. – С. 94-100. – DOI 10.34708/GSTOU.CONF.2020.71.23.033.

43. Кадакин, В.П. Контроль коррозионного состояния магистральных нефтепроводов на основе внутритрубной диагностики / В.П. Кадакин // Территория Нефтегаз. – 2008. – № 10. – С. 32-43.

44. Калмыкова, К.Г. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния участка магистрального газопровода в условиях осадки слабосвязанных грунтов / К.Г. Калмыкова, П.В. Бурков, С.П. Буркова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № S3. – С. 343-348.

45. Кильмухаметов, И.Ф. Разработка информационно-измерительной системы отслеживания местоположения средств очистки и диагностики трубопроводов / И.Ф. Кильмухаметов, Э.М. Сафин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021. – № 2(36). – С. 128-131. – DOI 10.25699/SSSB.2021.36.2.003.

46. Кири́н Е.М. Патент № 2312267 С1 Российская Федерация, МПК F16L 3/00. Устройство для фиксации магистрального трубопровода : № 2006117671/06 : заявл. 22.05.2006 : опубл. 10.12.2007 / Е.М. Кири́н, М.Н. Краси́н, А.В. Ежов ; заявитель Пензенский Государственный Университет (ПГУ).

47. Кири́н, Е.М. Патент № 2298717 С1 Российская Федерация, МПК F16L 1/00. способ ремонта магистрального трубопровода : № 2005137257/06 : заявл. 30.11.2005 : опубл. 10.05.2007 / Е.М. Кири́н, С.Н. Бори́сов ; заявитель Пензенский Государственный Университет (ПГУ).

48. Ки́рьянов, М.Ю. Применение инерциальных навигационных систем во внутритрубной диагностике / М.Ю. Ки́рьянов, В.В. Орлов // Наука

и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Т. 7, № 3. – С. 84-95.

49. Клешнин, Ю.А. Сравнение различных компенсаторов температурных удлинений трубопроводов / Ю.А. Клешнин // Вестник науки. – 2020. – Т. 1, № 8(29). – С. 86-89.

50. Ключевая ставка Банка России // Банк России: [сайт]. – URL: [https://www.cbr.ru/hd\\_base/keyrate/](https://www.cbr.ru/hd_base/keyrate/).

51. Ключевая ставка Банка России и инфляция // Банк России: [сайт]. – URL: [https://www.cbr.ru/hd\\_base/infl/#:~:text=](https://www.cbr.ru/hd_base/infl/#:~:text=).

52. Ковров, А.А. О путях повышения точности результатов мобильного лазерного сканирования / А.А. Ковров // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. – 2022. – № 1(25). – С. 10-18. – DOI 10.25587/SVFU.2022.25.1.009.

53. Колезнева, И.В. Применение средств геодезических измерений при техническом диагностировании магистральных газопроводов / И.В. Колезнева, Ю.Ю. Завьялова // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. – 2015. – Т. 3. – С. 207-216.

54. Колоколова, Н.А. О выборе способа прокладки трубопроводов в районах вечной мерзлоты / Н.А. Колоколова, Н.А. Гаррис // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2013. – № 1. – С. 13-17.

55. Колтаков, Д.А. Технологические аспекты основных причин аварий на нефтепроводах сбора / Д.А. Колтаков, Е.А. Шаповалова // Вестник науки. – 2024. – Т. 1, № 1(70). – С. 282-287.

56. Коннов, Ю.Д. Патент № 2708758 С2 Российская Федерация, МПК F16L 1/028, F16L 1/10. Способ ремонта дефектных участков трубопровода в траншее : № 2016139934 : заявл. 10.10.2016 : опубл. 11.12.2019 / Ю. Д. Коннов, Ю. Г. Матвеев, Р. Ф. Хабибуллин, А. Ю. Чеботарев.

57. Копысов, А.Ф. Патент № 2662466 С1 Российская Федерация, МПК G01N 27/00. Способ оценки коррозионного состояния участка подземного трубопровода по данным коррозионных обследований и внутритрубной диагностики : № 2017140104 : заявл. 17.11.2017 : опубл. 26.07.2018 / А.Ф. Копысов, В.Ю. Корзинин, А.В. Гончаров [и др.] ; заявитель Публичное акционерное общество "Транснефть" (ПАО "Транснефть"), Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта" (ООО "НИИ Транснефть").

58. Коробков, Г.Е. Выявление потенциально опасных участков на трубопроводах в активных геодинамических зонах / Г.Е. Коробков, Р.Х. Султангареев, Н.А. Исмаилова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2009. – № 1. – С. 3-6.

59. Кочергина, А.В. Перспективный метод ремонта нефтепроводов с помощью усиливающей композиционной муфты / А.В. Кочергина, И.А. Томарева, Р.В. Беляков // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 4(64). – С. 25.

60. Кошан, Е.К. Возможности, преимущества и недостатки наземного лазерного сканирования / Е.К. Кошан // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 9, № 1. – С. 27-30.

61. Крылов, А.Н. О численном решении уравнения, которым в технических вопросах определяются частоты малых колебаний материальных систем, Известия Академии наук СССР. VII серия. Отделение математических и естественных наук, 1931, № 4, 491–539.

62. Кузьбожев, А.С. Исследование влияния шага измерений профиля газопровода на точность расчета радиусов изгиба его оси / А.С. Кузьбожев, И.Н. Бирилло, М.М. Бердник // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2018. – № 4. – С. 43-49.

63. Куличков, С.В. Патент на полезную модель № 188586 U1 Российская Федерация, МПК F16L 55/18. Устройство для центрирования труб : № 2018138653 : заявл. 02.11.2018 : опубл. 17.04.2019 / С.В. Куличков,

О.Б. Ненашев ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДФУ).

64. Лазерный 3D сканер FARO Focus M70 // ООО «Гео-Спектр»: [сайт]. – URL: <https://www.geo-spektr.ru/lazernye-skanery/faro/Faro-Focus-M70.html>.

65. Левада, Ю.С. Применение высокоточных методов 3D сканирования / Ю.С. Левада, Д.С. Зеленков // Студенческие научные работы землеустроительного факультета : Сборник статей по материалам Международной студенческой научно-практической конференции, Краснодар, 19 февраля 2020 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2020. – С. 115-118.

66. Липчанский, Д.В. Модернизированные конструкции муфт для ремонта магистральных нефтепроводов / Д.В. Липчанский, Д.А. Дронов, Г.М. Алиев, К.А. Воробьев // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 2.

67. Макарычева, Е.М. 3D-ГИС для сопровождения работ по геотехническому мониторингу объектов магистральных трубопроводов / Е.М. Макарычева, Т.И. Кузнецов, С.А. Половков [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 10, № 4. – С. 342-351. – DOI 10.28999/2541-9595-2020-10-4-342-351.

68. Макарычева, Е.М. Перспективы использования метода воздушного лазерного сканирования при проведении инженерных изысканий на территории криолитозоны / Е.М. Макарычева, Т.И. Кузнецов // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : материалы шестнадцатой общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций, Москва, 01–03 декабря 2021 года / ООО «Геомаркетинг»; ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве»; Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве» - Общероссийское отраслевое объединение

работодателей Союз изыскателей. – Москва: Геомаркетинг, 2021. – С. 390-396.

69. Мастобаев, Б.Н. Напряженно-деформированное состояние газопровода на пересечениях с геодинамическими зонами по данным неоднократной внутритрубной дефектоскопии / Б.Н. Мастобаев, Р.М. Аскарлов, С.В. Китаев [и др.] // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. – № 6. – С. 50-57.

70. Матвеев, Ю.Г. Патент на полезную модель № 148090 U1 Российская Федерация, МПК F16L 1/26. Опорно-центрирующее устройство концевой участка магистрального нефте- или газопровода : № 2014111881/06 : заявл. 27.03.2014 : опубл. 27.11.2014 / Ю.Г. Матвеев, Ю.Д. Коннов, Д.И. Сидоркин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уфимский государственный нефтяной технический университет".

71. Мерициди, И.И. Исследования прочностных характеристик защитной муфты, используемой при ремонте подводных трубопроводов / И.И. Мерициди, К.Х. Шотиди, И.А. Мерициди // Территория Нефтегаз. – 2020. – № 7-8. – С. 126-131.

72. Муравьев, М.И. Патент № 2010113955 РФ, МПК F 16 L 1/028 Способ ремонта линейного участка трубопровода на слабонесущих грунтах : № 2010113955/06 : заявл. 09.04.2010: опубл. 20.10.2010 / М.И. Муравьев, И.А. Носков.

73. Мусайбекова, А.К. Мониторинг линейной части магистрального нефтепровода. Внутритрубная диагностика / А.К. Мусайбекова, Ю.В. Непойранова, И.Н. Квасов // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : Материалы 8-й международной научно-технической конференции, Омск, 26 февраля – 02 2018 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2018. – С. 188.

74. Неганов, Д.А. Использование ремонтных конструкций для выборочного ремонта трубопроводов / Д.А. Неганов, Н.Г. Гончаров, А.А. Юшин, О.И. Колесников // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 7. – С. 120-123. – DOI 10.24887/0028-2448-2018-7-120-123.

75. Неганов, Д.А. Разработка расчетных схем подземных трубопроводов с ненормативной кривизной оси с учетом данных внутритрубной диагностики / Д.А. Неганов, В.М. Варшицкий, Э.Н. Фигаров, С.В. Эрмиш // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Т. 7, № 6. – С. 16-27.

76. Никишин, Е.А. Способы компенсации температурных деформаций технологических трубопроводов / Е.А. Никишин // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей XXXIX Международной научно-практической конференции, Пенза, 15 ноября 2020 года. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. – С. 32-34.

77. Новикова, В.Е. Технологии инженерно геодезических изысканий магистральных трубопроводов, применяемых в районах многолетней мерзлоты / В.Е. Новикова, А.Р. Баширова // ДОСТИЖЕНИЯ ВУЗОВСКОЙ науки 2020 : сборник статей XVI Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 15 ноября 2020 года. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. – С. 318-321.

78. Носов, А.Г. Патент № 2645837 С1 Российская Федерация, МПК F16L 1/10. Центрирующее устройство : № 2016144995 : заявл. 16.11.2016 : опубл. 28.02.2018 / А.Г. Носов, А.К. Лесков, И.С. Галимов ; заявитель Публичное акционерное общество "Транснефть" (ПАО "Транснефть"), Акционерное общество "Транснефть - Сибирь" (АО "Транснефть - Сибирь").

79. Павлова, З.Х. Анализ влияния конструктивных решений криволинейных участков подземных трубопроводов на их напряженно-деформированное состояние / З.Х. Павлова, А.Д. Павлова, Х.А. Азметов,

М.А. Харин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – № 4(126). – С. 73-79. – DOI 10.17122/ntj-oil-2020-4-73-79.

80. Павлова, З.Х. Прочность и безопасность эксплуатации отремонтированного участка трубопровода с применением совместно стальной муфты и композитного материала / З.Х. Павлова, А.Д. Павлова, Х.А. Азметов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – № 4(132). – С. 26-33. – DOI 10.17122/ntj-oil-2021-4-26-33.

81. Павлова, З.Х. Определение параметров напряженно-деформированного состояния криволинейных участков подземных трубопроводов нефтегазовой отрасли / З.Х. Павлова, Ю.В. Дудников, Х.А. Азметов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – № 6(134). – С. 116-125. – DOI 10.17122/ntj-oil-2021-6-116-125.

82. Постановление Правительства РФ от 22 ноября 1997 г. N 1470 «Об утверждении Порядка предоставления государственных гарантий на конкурсной основе за счет средств Бюджета развития Российской Федерации и Положения об оценке эффективности инвестиционных проект».

83. Р Газпром 2-2.3-595-2011 Правила назначения методов ремонта дефектных участков линейной части магистральных газопроводов Единой системы газоснабжения ОАО «Газпром». М.: Газпром экспо, 2012. – 47 с.

84. Рамазанов, Р.Р. Анализ дефектов технологических трубопроводов и методов их ремонта / Р.Р. Рамазанов, И.Ф. Кантемиров, Д.А. Гулин, И.Ф. Махмудова // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20. – №. 2. – С. 78-85.

85. РД 153-39.4-067-04 Методы ремонта дефектных участков действующих магистральных нефтепроводов: руководящий документ. Москва: АК «Транснефть», ОАО «ЦТД «Диаскан», 2004. – 52 с.



86. РД 153-39.4-130-2002. Регламент по вырезке и врезке катушек соединительных деталей, заглушек, запорной и регулирующей арматуры и подключению участков магистральных нефтепроводов. Москва: ГУП Издательство «Нефть и газ», 2002.

87. Резвых, А.В. Обеспечение безопасной эксплуатации магистрального газопровода Оренбург - Новопсков на участке от 0 до 123 км / А.В. Резвых, А.С. Клещерева, А.И. Резвых // Нефтегазовое производство - основа научно-технического прогресса и экономической стабильности : Материалы научно-практической конференции, посвященной 35-летию Оренбургского филиала РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Оренбург, 22 января 2020 года / Под общей редакцией С.Г. Горшенина. – Оренбург: Общество с ограниченной ответственностью "Амирит", 2020. – С. 411-418.

88. Середенок, В.А. Разработка методики реконструкции магистральных газопроводов методом "труба в трубе" на осложненных участках трассы : специальность 25.00.19 "Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Середенок Виктор Аркадьевич. – Ухта, 2020. – 157 с.

89. Середович, В.А. Состояние, проблемы и перспективы применения технологии наземного лазерного сканирования / В.А. Середович, Д.В. Комиссаров // Гео-Сибирь. – 2005. – Т. 1, № 1. – С. 193-196.

90. Сидоркин, Д.И. Патент № 2763096 С1 Российская Федерация, МПК F16L 1/10, F16L 1/026. Устройство фиксирования и центрирования концов трубопровода при вырезке его дефектного участка : № 2021109873 : заявл. 09.04.2021 : опубл. 27.12.2021 / Д.И. Сидоркин, И.А. Шаммазов, Э.Р. Джемилев ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

91. Сидоркин, Д.И. Патент № 2791795 С1 Российская Федерация, МПК F16L 1/028, F16L 1/10. Способ ремонта дефектных участков магистральных трубопроводов : № 2022131128 : заявл. 30.11.2022 : опубл. 13.03.2023 / Д.И. Сидоркин, И.А. Шаммазов, **Э.Р. Джемилев**, В.В. Пшенин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет».

92. Сидоркин, Д.И. Патент на полезную модель № 216133 U1 Российская Федерация, МПК F16L 1/10, F16L 1/026. Устройство фиксирования и центрирования концов трубопровода при его ремонте с вырезкой дефектного участка : № 2022130640 : заявл. 25.11.2022 : опубл. 17.01.2023 / Д.И. Сидоркин, И.А. Шаммазов, **Э.Р. Джемилев** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

93. Смирнов, С.В. Волоконно-оптические технологии для создания безопасных условий эксплуатации трубопроводных систем в труднодоступных и сложных природноклиматических регионах / С.В. Смирнов, Х.В. Иванов // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 2. – С. 33-39.

94. Спириденко, А.А. 3D лазерное сканирование строительных конструкций / А.А. Спириденко, А.В. Горина, Н.Б. Хахулина // Студент и наука. – 2018. – № 4. – С. 53-60.

95. Тальнишних, А.Г. Комплексная диагностика магистральных трубопроводов / А.Г. Тальнишних, В.И. Кучерюк // Нефть и газ Западной Сибири : Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Тюменского индустриального института, Тюмень, 17 октября 2013 года / ответственный редактор: О.А. Новоселов. Том 2. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2013. – С. 110-114.

96. Терентьев, Д.А. Лазерное сканирование зданий и сооружений в геодезии / Д.А. Терентьев // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук : Сборник докладов Национальной конференции с международным участием , Белгород, 18–20 мая 2022 года. Том Часть 1 . – Белгород: Белгородский государственный технол..огический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 627-632.

97. Технические характеристики лазерного сканера Faro Focus S350 // ООО «Геооптик»[сайт]. – URL: <https://www.geooptic.ru/product/lazernyyu-skaner-faro-focus-s350>.

98. Технические характеристики лазерного сканера Greenvalley LiAir 50 // ООО «Гео-Спектр». – URL: <https://www.geo-spektr.ru/lazernye-skanery/LiAir-50.html>.

99. Технические характеристики лазерного сканера Hexagon RS6 Laser Scanner // ООО «Проминспект» [сайт]. – URL: <https://prominspect.ru/equipment/hexagon/arms-accessories/arm-scanners/rs6/>.

100. Технические характеристики лазерного сканера Leica RTC360 // Leica Geosystems [сайт]. – URL: <https://leica-geosystems.com/ru/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>.

101. Технические характеристики лазерного сканера Leica TS60 I // ООО «ГиС» [сайт]. – URL: <https://gis2000.ru/equipment/takheometr-leica-ts60-i.html>.

102. Технические характеристики лазерного сканера Phoenix miniRANGER-3 LITE // Phoenix Lidar Systems [сайт]. – URL: <https://phoenixlidar.com/miniranger-3/>.

103. Технические характеристики лазерного сканера ScanForm L5 // ScanForm [сайт]. – URL: <https://scanform.ru/product/scanform-hr1215/>.

104. Тимофеева, Л.А. Исследование влияния талых вод на напряженно-деформированное состояние трубопровода / Л.А. Тимофеева // Проблемы геологии и освоения недр : Труды XXIV Международного

симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 75-летию Победы в Великой Отечественной войне, Томск, 06–10 апреля 2020 года. Том 2. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2020. – С. 539-540.

105. Томышев, К.А. Распределённые волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности / К.А. Томышев, В.А. Баган, В.А. Астапенко // ТРУДЫ МФТИ. Труды Московского физико-технического института (национального исследовательского университета). – 2012. – Т. 4, № 2(14). – С. 64-72.

106. Федорова, В.С. Обработка результатов лазерного сканирования на примере элементов строительных конструкций / В.С. Федорова, Н.В. Гречушкина // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : Сборник материалов V Национальной научно-практической конференции, Омск, 28 апреля – 29 2022 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. – С. 621-625.

107. Федосовский, М.Е. Опыт проведения внутритрубной диагностики трубопроводов с выявлением дефектов КРН и коррозии / М.Е. Федосовский, М.В. Соколов, А.В. Сорокин, В.А. Аржанов // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – № 4(46). – С. 18-22.

108. Филимонов, А.А. Проектирование промышленных подземных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах с использованием современных комплексов проектирования / А.А. Филимонов, Д.В. Липихин, А.Е. Мельников, К.В. Кирьянова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 127-137. – DOI 10.31675/1607-1859-2021-23-4-127-137.

109. Фирстов, А.А. Патент № 2750417 С1 Российская Федерация, МПК G01L 1/00, G01B 7/00. Способ определения изгибных напряжений в стенке подземного трубопровода : № 2020139694 : заявл. 03.12.2020 : опубл. 28.06.2021 / А. А. Фирстов, Р. В. Агиней, С. В. Савченков, Э. А. Мамедова ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

110. Харисов, Р.А. Особенности ремонта трубопровода с использованием муфт различных конструкций / Р.А. Харисов, Р.Ф. Сафаров, И.Р. Фархетдинов, А.А. Яушева [и др.] // Перспективы науки. – 2015. – № 6(69). – С. 74-79.

111. Хоперский, Г.Г. Патент № 2217650 С2 Российская Федерация, МПК F16L 55/18, F16L 1/036. устройство для центрирования труб : № 2000101521/06 : заявл. 18.01.2000 : опубл. 27.11.2003 / Г. Г. Хоперский, В. В. Прокофьев ; заявитель Открытое акционерное общество "Сибнефтепровод".

112. Худякова, А.А. Анализ и повышение надёжности эксплуатации нефтепроводов на Крайнем Севере / А.А. Худякова, М.Г. Губайдуллин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2008. – № 4(74). – С. 92-97.

113. Чернова, Н.В. Сравнительный анализ современных наземных лазерных сканеров / Н.В. Чернова, В.А. Шишкина, А.А. Шевченко // Прорывные научные исследования : сборник статей V Международной научно-практической конференции, Пенза, 15 октября 2016 года. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2016. – С. 59-64.

114. Чучкалов, М.В. Оценка допустимости приобретенной кривизны газопровода по данным внутритрубной диагностики / М.В. Чучкалов, Р.М. Аскарлов, С.В. Китаев [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14, № 3. – С. 124-127.

115. Шаммазов, И.А. Анализ способов и устройств для ремонта магистральных трубопроводов с вырезкой дефектного участка / И.А. Шаммазов, Д.И. Сидоркин, Э.Р. Джемилев // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – № 3(131). – С. 52-66. – DOI 10.17122/ntj-oil-2021-3-52-66.

116. Шаммазов, И.А. Сравнительный анализ методик оценки величины радиуса упругого изгиба магистрального трубопровода / И.А. Шаммазов, Д.И. Сидоркин, Э.Р. Джемилев, В.В. Пшенин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – № 1(135). – С. 48-65. – DOI 10.17122/ntj-oil-2022-1-48-65.

117. Шкутов, И.В. Методика оценки напряженно-деформированного состояния нефтегазопроводов на основе внутритрубных инспекционных приборов / И.В. Шкутов // Трубопроводный транспорт углеводородов : материалы V Всероссийской научно-практической конференции, Омск, 28 октября 2022 года / Омский государственный технический университет. – Омск: Омский государственный технический университет, 2022. – С. 98-103. 90.

118. Шкутов, И.В. Применение высокоточечной инклинометрии для мониторинга напряженного состояния трубопроводов и резервуаров / И.В. Шкутов // Нефтегазовый терминал : Материалы международной научно-технической конференции, Тюмень, 02–03 декабря 2021 года / Под общей редакцией Ю.Д. Земенкова. Том Выпуск 22. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. – С. 240-244.

119. Шляхова, М.М. Использование 3D-моделей для контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов / М.М. Шляхова // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : Материалы VIII Международной научной конференции; электронное научное издание, Красноярск, 14–17 сентября 2021 года / Науч. редактор Е.А. Ваганов, отв. ред. Г.М. Цибульский. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2021. – С. 144-147.

120. Шляхова, М.М. Мониторинг объектов нефтегазовой отрасли с помощью воздушного лазерного сканирования / М.М. Шляхова, И.Ю. Лакеев // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2022. – Т. 27, № 6. – С. 64-72. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-6-64-72.

121. Ansari Sadrabadi, S. Experimental-Numerical Investigation of a Steel Pipe Repaired with a Composite Sleeve / S. Ansari Sadrabadi, A. Dadashi, S. Yuan [et al.] // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2022. – Vol. 12, No. 15. – P. 7536. – DOI 10.3390/app12157536.

122. Aryan, A. Planning for terrestrial laser scanning in construction: A review / A. Aryan, F. Bosché, P. Tang // *Automation in Construction*. – 2021. – Vol. 125. – P. 103551.

123. Askarov, R.M. Analysis of Longitudinal Stresses in Main Pipelines with a Long Operating Life / R.M. Askarov, A.K. Gumerov, K.S. Shamilov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Science and Technology Conference "EarthScience"*, Russky Island, 10–12 декабря 2019 года. Vol. 459, 4, Chapter 3. – Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 042047. – DOI 10.1088/1755-1315/459/4/042047.

124. Barinova, K.G. Using space images for calibration linear referencing system for geospatial pipeline simulation / K.G. Barinova, D.V. Dolgoplov, V.A. Melkiy [et. al] // *Vestnik SSUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. – 2023. – Vol. 28, № 1. – P. 70–79.

125. Budhe, S. Composite repair system for corroded metallic pipelines: an overview of recent developments and modelling / S. Budhe, M.D. Banea, S. De Barros // *Journal of Marine Science and Technology*. – 2020. – Vol. 25, No. 4. – P. 1308-1323. – DOI 10.1007/s00773-019-00696-3.

126. Burkov, P.V. Stress-strain state of pipeline depending on complicated environment / P.V. Burkov, M.A. Filimonenko, S.P. Burkova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Tomsk, 04–08 апреля 2016 года. Vol. 43, №1. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2016. – P. 012044. – DOI 10.1088/1755-1315/43/1/012044.

127. Chen, P. Research and Method for In-line Inspection Technology of Girth Weld in Long-Distance Oil and Gas Pipeline / P. Chen, R. Li, K. Fu, X. Zhao // *Journal of Physics: Conference Series* : 7, Dali., 18–20 июня 2021 года. – Dali., 2021. – P. 012052. – DOI 10.1088/1742-6596/1986/1/012052.

128. Chen, Zh. Internal deformation monitoring for earth-rockfill dam via high-precision flexible pipeline measurements / Zh. Chen, Yu. Yin, J. Yu [et al.] // *Automation in Construction*. – 2022. – Vol. 136. – P. 104177. – DOI 10.1016/j.autcon.2022.104177.

129. Cheng, L. Experimental verification research of pipeline deflection deformation monitoring method based on distributed optical fiber measured strain / L. Cheng, H. Mao, P. Pan [et al.] // *Measurement*. – 2022. – Vol. 199. – P. 111483. – DOI 10.1016/j.measurement.2022.111483.

130. Dedkova, V.V. Analysis of Methods and Means of Control of Main Pipelines' Protective Structures / V.V. Dedkova, A.V. Komissarov // *Vestnik SSUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 2020. Vol. 25, № 4. P. 77–84.

131. Dolgopolov, D.V. Analysis of Accuracy of Initial Data Used in Modeling Relief and Profile of the Main Pipelines Route / D.V. Dolgopolov, E.I. Avrunev, V.A. Melkiy [et al.] // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. – 2022. – Vol. 333, № 4. P. – 168–180.

132. **Dzhemilev, E.R.** Developing technology and device for the main pipelines repair with cutting out their defective sections / E.R. Dzhemilev, I.A. Shammazov, D.I. Sidorkin [et al.] // *Neftyanoe Khozyaystvo - Oil Industry*. 2022. Vol. 2022, № 10. P. 78–82.

133. Gunatilake, A. Stereo vision combined with laser profiling for mapping of pipeline internal defects / A. Gunatilake, L. Piyathilaka, A. Tran // *IEEE Sensors Journal*. – 2020. – Vol. 21. – №. 10. – P. 11926-11934.

134. Hemmati, S. Performance Evaluation of Natural Gas Transmission Pipelines in Landslides / S. Hemmati, A. Vasseghi, E. Haghshenas // *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*. – 2023. – Vol. 25. – №. 4. – P. 43-57.

135. Ignatik, A.A. Inclino-metric measurements on the pipeline to assess its stress-strain state in laboratory conditions // *Neftyanoe Khozyaystvo - Oil Industry*. – 2022. – Vol. 2022, № 4. – P. 78–82.



136. Kornilova, Z.G On the influence of natural climatic conditions on the planned-high-altitude position of the pipeline / Z.G. Kornilova, G.S. Ammosov, D.S. Ivanov, A.A. Antonov // Procedia Structural Integrity : 15th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2021, Ekaterinburg, 20–24 декабря 2021 года. – Elsevier B.V.: Elsevier B.V., 2022. – P. 245-250. – DOI 10.1016/j.prostr.2022.04.033.

137. Kumar Singh, S. A review of laser scanning for geological and geotechnical applications in underground mining / S. Kumar Singh, B. Pratap Banerjee, S. Raval // International Journal of Mining Science and Technology. – 2023. – Vol. 33, №. 2. – P. 133-154. – DOI 10.1016/j.ijmst.2022.09.022.

138. Lopatin, B.A. Improved design of machine for cold cutting of oil pipes and gas pipelines / B.A. Lopatin, T.R. Khaziev // International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015), Chelyabinsk, 22–23 октября 2015 года. – Chelyabinsk, 2015. – P. 563-570. – DOI 10.1016/j.proeng.2015.12.058.

139. Mousa, S. The efficiency of advanced polymeric composite sleeves in the rehabilitation of cracked pipelines under combined loadings / S. Mousa, M. Mutnbak, A.A. Abd-Elhady [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 25. – P. 6395-6406. – DOI 10.1016/j.jmrt.2023.07.078.

140. Nair, G.S. Numerical Study of Horizontally Bent Buried Steel Pipelines Subjected to Oblique Faulting / G.S. Nair, S.R. Dash, G. Mondal // Journal of Pressure Vessel Technology. – 2022. – Vol. 144. – №. 5. – P. 051803.

141. Shad, M.R. Investigation of Rupture of 24-inch Diameter Gas Pipeline Near Pipe-Bend / M.R. Shad, F.Ul Hasan, U. Hayat, Z. Aftab // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2022. – Vol. 22, No. 2. – P. 858-863. – DOI 10.1007/s11668-022-01377-x.

142. Shammazov, I. Improving the Method of Replacing the Defective Sections of Main Oil and Gas Pipelines Using Laser Scanning Data / I. Shammazov, E. Dzhemilev, D. Sidorkin // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 48. – DOI 10.3390/app13010048.

143. Shammazov, I.A. Research of the Dependence of the Pipeline Ends Displacement Value When Cutting Out Its Defective Section on the Elastic Stresses in the Pipe Body / I.A. Shammazov, D.I. Sidorkin, **E.R. Dzhemilev** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, 10–12 января 2022 года. – Virtual, Online, 2022. – P. 022077. – DOI 10.1088/1755-1315/988/2/022077.

144. Shuai, Y. Modeling of local buckling of corroded X80 gas pipeline under axial compression loading / Y. Shuai, X.H. Wang, Y.F. Cheng // J Nat Gas Sci Eng. Elsevier B.V. – 2020. – Vol. 81. – № April. P. 103472.

145. Shults, R. Analysis of the displacements of pipeline overpasses based on geodetic monitoring results / R. Shults, A. Annenkov, A. Khailak [et al.] // Geodesy and Geodynamics. – 2021. – DOI 10.1016/j.geog.2021.09.005.

146. Tarasenko, A.A. Study of stress-strain state of pipeline under permafrost conditions / A.A. Tarasenko, P.V. Chepur, M.N. Redutinskiy, A.A. Gruchenkova // Journal of Physics: Conference Series, Tomsk, 17–20 января 2018 года. – Tomsk, 2018. – P. 032048. – DOI 10.1088/1742-6596/1015/3/032048.

147. Vasseghi, A. Failure analysis of a natural gas pipeline subjected to landslide / A. Vasseghi, E. Haghshenas, A. Soroushian, M. Rakhshandeh // Engineering Failure Analysis. – 2021. – Vol. 119. – P. 105009.

148. Vogt, M. Comparison of iPad Pro's LiDAR and TrueDepth Capabilities with an Industrial 3D Scanning Solution / M. Vogt, A. Rips, C. Emmelmann // Technologies (Basel). – 2021. – Vol. 9. – № 2. – P. 1–13.

149. Zahid, U. A methodology for flexibility analysis of pipeline systems / U. Zahid, S.Z. Khan, M.A. Bukhari [et. al] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 233. – №. 4. – P. 893-907.

150. Zahid, U. An analytical procedure for modelling pipeline-landslide interaction in gas pipelines / U. Zahid, S. Mauro, A. Godio // Journal of Natural

Gas Science and Engineering. – 2020. – Vol. 81. – P. 103474. – DOI 10.1016/j.jngse.2020.103474.

151. Zhang, H. Effects of fillet weld size and sleeve material strength on the residual stress distribution and structural safety while implementing the new sleeve repair process / H. Zhang, T. Han, Y. Wang, Q. Wu // Materials. 2021. Vol. 14, № 23.

152. Zhang, S. Pipeline deformation monitoring using distributed fiber optical sensor / S. Zhang, B. Liu, J. He // Measurement. – 2019. – Vol. 133. – P. 208-213.

153. Zhang, X. Method of strain analysis of pipelines under landslides: An improved semi-analytical method for softening bending moment-curvature / X. Zhang, Y. Cao, Y. Zhen [et al.] // Thin-Walled Structures. – 2023. – Vol. 192. – P. 111222.

154. Zhou, X. Underground Pipeline Mapping from Multi-positional Data: Data Acquisition Platform and Pipeline Mapping Model / X. Zhou, A. Chen, M. Usman, [et. al] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2023.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Патент на изобретение «Устройство фиксирования и центрирования концов трубопровода при вырезке его дефектного участка»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2763096

УСТРОЙСТВО ФИКСИРОВАНИЯ И  
ЦЕНТРИРОВАНИЯ КОНЦОВ ТРУБОПРОВОДА ПРИ  
ВЫРЕЗКЕ ЕГО ДЕФЕКТНОГО УЧАСТКА

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Сидоркин Дмитрий Иванович (RU), Шаммазов Ильдар Айратович (RU), Джемилёв Энвер Русланович (RU)*

Заявка № 2021109873

Приоритет изобретения 09 апреля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 27 декабря 2021 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 апреля 2041 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Нелиев





## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Патент на полезную модель «Устройство фиксирования и центрирования концов трубопровода при его ремонте с вырезкой дефектного участка»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 216133**

#### УСТРОЙСТВО ФИКСИРОВАНИЯ И ЦЕНТРИРОВАНИЯ КОНЦОВ ТРУБОПРОВОДА ПРИ ЕГО РЕМОНТЕ С ВЫРЕЗКОЙ ДЕФЕКТНОГО УЧАСТКА

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Сидоркин Дмитрий Иванович (RU), Шаммазов Ильдар Айратович (RU), Джемилёв Энвер Русланович (RU)*

Заявка № 2022130640

Приоритет полезной модели **25 ноября 2022 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации **17 января 2023 г.**

Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает **25 ноября 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Ю.С. Зубов*





## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Патент на изобретение «Способ ремонта дефектных участков  
магистральных трубопроводов»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2791795

СПОСОБ РЕМОНТА ДЕФЕКТНЫХ УЧАСТКОВ  
МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Сидоркин Дмитрий Иванович (RU), Шаммазов  
Ильдар Айратович (RU), Джемилёв Энвер Русланович  
(RU), Пшенин Владимир Викторович (RU)*

Заявка № 2022131128

Приоритет изобретения 30 ноября 2022 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 13 марта 2023 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 30 ноября 2042 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов





## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ  
«Программа для расчета эксплуатационных нагрузок на устройства  
фиксирования и центрирования концов трубопровода при его ремонте  
с вырезкой дефектного участка»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023662609

ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА  
УСТРОЙСТВА ФИКСИРОВАНИЯ И  
ЦЕНТРИРОВАНИЯ КОНЦОВ ТРУБОПРОВОДА ПРИ  
ЕГО РЕМОНТЕ С ВЫРЕЗКОЙ ДЕФЕКТНОГО  
УЧАСТКА

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Санкт-  
Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Джемилёв Энвер Русланович (RU), Сидоркин Дмитрий  
Иванович (RU), Ратников Константин Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2023617331

Дата поступления 19 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 июня 2023 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ю.С. Зубов'.

Ю.С. Зубов

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д****Акт внедрения результатов диссертации в деятельности  
ООО «Промышленная геодезия»**

Утверждаю  
Ген. директор ООО «Промгеодезия»  
В.В. Петров  
Дата « 27 » февраля 2024 г.  
Печать организации

**АКТ**

о внедрении результатов кандидатской диссертации  
Джемилёва Энвера Руслановича  
на тему: «Обоснование способа ремонта магистральных нефтегазопроводов с  
вырезкой их упруго-изогнутых дефектных участков»  
по научной специальности 2.8.5. – «Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ»

Комиссия в составе:

Председатель: В.В. Петров;

Члены комиссии:

1. Инженер, В.О. Медяников;
2. Инженер, М.А. Иванов;
3. Инженер, В.А. Суворов;
4. Инженер, Ю.В. Зуев

составили настоящий акт о том, что результаты кандидатской диссертации на тему «Обоснование способа ремонта магистральных нефтегазопроводов с вырезкой их упруго-изогнутых дефектных участков», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, а именно технология оценки пространственного положения центральной оси магистрального трубопровода использованы ООО «Промышленная геодезия» при производстве следующих видов работ:

1. Определение пространственного положения центральных осей двух соединяемых между собой участков трубопровода наружным диаметром 1020 мм для обеспечения изготовления и точной приварки соединительного участка



трубопровода на базе производственного обслуживания компании АО «Черномортранснефть».

В результате применение разработанной технологии обеспечило точное изготовление и монтаж соединительного участка трубопровода с точностью до 2 мм по вертикальной и горизонтальной осям и углом до 1° между торцами привариваемого участка и концами ремонтируемого трубопровода.

Предлагаемая технология оценки пространственного положения центральной оси магистрального трубопровода и рекомендации по проведению его лазерного сканирования с учетом неровностей изоляционного покрытия, а также минимальной величины угла сектора лазерного сканирования, разработанные в рамках написания кандидатской диссертации Джемилёва Энвера Руслановича, позволяют обеспечить необходимую точность при оценке пространственного положения трубопровода в процессе производства ремонтных работ и последующих изготовлении и монтаже соединительного участка.

**Председатель комиссии**

Ген. директор



Петров Владимир Викторович

**Члены комиссии:**

Инженер



Медяников Владимир Олегович

Инженер



Иванов Максим Александрович

Инженер



Суворов Василий Александрович

Инженер



Зуев Юрий Викторович