

*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*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент

*Шаммазов Ильдар Айратович*

**Официальные оппоненты:**

*Кузьбожев Александр Сергеевич*

доктор технических наук, профессор, филиал общества с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, отдел надежности и ресурса Северного коридора газотранспортной системы филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ», начальник отдела;

*Фигаров Эльдар Намикович*

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», лаборатория прочностных расчетов отдела оценки технического состояния и прочностных расчетов, заместитель заведующего лабораторией.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Защита диссертации состоится **10 сентября 2024 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.11 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, аудитория № 3321.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 10 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ФЕТИСОВ  
Вадим Георгиевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **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, Р.С. 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 по п 1. и п. 4.**

**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 фиксации 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).

**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 фиксации 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, 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 (далее – Перечень ВАК), 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.

**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., профес-

сору 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.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, перечислены применяемые методы исследования, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен анализ применяемых методов ремонта магистральных трубопроводов. Выявлено, что ремонт магистральных трубопроводов с вырезкой дефектного участка является наиболее применяемым методом. При этом основными факторами, осложняющими процесс ремонтных работ, являются: наличие упругого изгиба ремонтируемого участка трубопровода, что приводит к резкому смещению концов трубопровода, находящихся по краям от места его первого разрезания, и необходимость применения трубоукладчиков, транспортировка которых требует дополнительной оплаты.

Исходя из этого, была выдвинута идея разработки способа ремонта с применением устройств, позволяющих удерживать концы трубопровода от их резкого смещения при его разрезании, а также с помощью системы гидроцилиндров осуществить дальнейшее центрирование концов трубопровода перед приваркой нового участка без применения трубоукладчиков. Расчет усилий, необходимых для фиксации и центрирования концов ремонтируемого участка трубопровода, осуществляется с помощью

коэффициентов уравнения полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода.

Среди проанализированных методов оценки актуального пространственного положения центральной оси трубопровода наиболее достоверным в полевых условиях является метод лазерного сканирования ремонтируемого участка трубопровода, который заключается в получении координат облака точек его поверхности путем использования лазерного сканера. Тем не менее, для дальнейшей оценки величин коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода на основе координат облака точек его поверхности, требуется разработка специальных методов обработки облака точек и рекомендаций к проведению процесса лазерного сканирования.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

**Во второй главе** описана разработанная схема конструкции устройства для фиксирования и центрирования концов трубопровода и последовательность работ по ремонту магистральных трубопроводов с применением предлагаемых устройств.

Приведены результаты разработки математической модели для расчета значений усилий, необходимых для устранения резкого смещения концов трубопровода при его разрезании и для их дальнейшего центрирования.

**В третьей главе** описаны экспериментальные исследования, проведенные на разработанном стенде, в результате которых подтверждена величина относительного отклонения в пределах 5% результатов расчетов по разработанной математической модели от результатов экспериментов.

**В четвертой главе** представлен разработанный метод оценки коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубопровода на

основе координат облака точек его поверхности, полученных в результате его лазерного сканирования.

**В пятой главе** представлены результаты технико-экономической оценки эффективности применения разработанного способа ремонта магистральных трубопроводов.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**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.**

Для разработки математической модели была составлена расчетная схема консольной балки, установленной на двух неподвижных опорах и находящейся в процессе колебаний в результате отклонения ее пространственного положения от положения статического равновесия. Сторона ремонтируемого участка трубопровода после его первого разрезания в расчетной схеме представлена консольной балкой, а захваты устройств фиксирования и центрирования представлены неподвижными опорами (рисунок 1). Для упрощения математической модели масса балки в расчетной схеме разбита на три сосредоточенные массы  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ . Расчетная схема трубопровода в процессе его колебаний представлена на рисунке 2.

Пространственное положение центральной оси ремонтируемого участка трубопровода до его разрезания принималось во внимание на этапе расчета перемещений выбранных сосредоточенных масс, исходя из расчетной схемы, представленной на рисунке 3, и было задано уравнением полинома (1):

$$y(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + ex, \quad (1)$$

где  $x$  – координата сечения трубопровода, отсчитываемая от края ремонтного котлована, м;  $y(x)$  – прогиб трубопровода в сечении  $x$ , м;  $a, b, c, e$  – коэффициенты полинома.

В результате была получена система уравнений (2):

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

где  $x$  – горизонтальная координата сечения трубопровода, м;  $t$  – время, прошедшее от начала процесса колебаний, с;  $l$  – длина стороны участка трубопровода, м;  $l_1, l_2$  – расстояние от сечения жесткой заделки до захватов первого и второго устройств, соответственно, м;  $Q_0(t)$  – поперечная сила в месте жесткой заделки трубопровода в момент времени  $t$ , Н;  $M_0(t)$  – изгибающий момент в месте жесткой заделки трубопровода в момент времени  $t$ , Н·м;  $X_j(t)$  – динамическая составляющая усилий, создаваемых захватами  $j$ -го устройства фиксирования и центрирования при резком смещении конца трубопровода, в момент времени  $t$ , Н;  $Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t)$  – силы инерции, действующие на сосредоточенные массы в момент времени  $t$ , Н;  $E$  – модуль Юнга стали трубопровода, Па;  $I$  – осевой момент инерции сечения трубопровода, м<sup>4</sup>.

Величинами усилий, необходимыми для устранения резкого смещения конца трубопровода являются максимальные усилия за время его колебаний  $t$ , вычисляемые по формуле (3):

$$\begin{aligned} X_{1n}(t) &= X_1(t) + X_1^{cm}, \\ X_{2n}(t) &= X_2(t) + X_2^{cm} \end{aligned}, (3)$$

где  $X_j^{cm}$  – усилия, необходимые для удерживания трубопровода в конце процесса колебаний, вычисляемые путем решения системы уравнений (4):

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1^{cm} + \delta_{12}X_2^{cm} + \Delta_{1c} + \Delta_{1P} = y(l_1) \\ \delta_{21}X_1^{cm} + \delta_{22}X_2^{cm} + \Delta_{2c} + \Delta_{2P} = y(l_2) \end{cases}, \quad (4)$$

где  $\delta_{ij}$  – коэффициенты канонических уравнений метода сил, характеризующие перемещение  $i$ -го сечения с координатой  $l_i$  в результате действия  $j$ -го усилия центрирования, м/Н;  $\Delta_{ic}$  – кинематические члены, обусловленные угловым смещением в заделке;  $\Delta_{iP}$  – грузовые члены, обусловленные прогибом трубопровода в результате действия распределенной нагрузки от собственного веса, м;  $y(l_i)$  – прогиб трубопровода в сечении с координатой  $l_i$ , м.

Далее осуществляется расчет величин усилий, необходимых для центрирования каждого из концов трубопровода относительно друг друга, решением системы уравнений (5):

$$\begin{cases} \frac{P_1(l-l_1)^2}{2} + \frac{P_2(l-l_2)^2}{2} + M_0l + \frac{Q_0l^2}{2} - \frac{ql^3}{6} + EI\theta_0 = 0 \\ \frac{P_1(l-l_1)^3}{6} + \frac{P_2(l-l_2)^3}{6} + \frac{M_0l^2}{2} + \frac{Q_0l^3}{6} - \frac{ql^4}{24} + EI\theta_0l - EIlh = 0, \\ Q_0 = ql - P_1 - P_2 \\ M_0 = -\frac{ql^2}{2} + P_1l_1 + P_2l_2 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $P_j$  – усилия центрирования концов трубопровода, создаваемые захватами  $j$ -го устройства, м;  $q$  – распределенная нагрузка от собственного веса трубопровода, Н/м;  $\theta_0$  – угол наклона трубопровода в сечении жесткой заделки, рад;  $h$  – перемещение конца трубопровода при центрировании, м.

Сравнивались результаты расчетов по разработанной математической модели и экспериментальных исследований на со-

зданном стенде (рисунок 4). Жесткой заделкой трубы и приложением усилия с противоположного конца путем подвешивания груза реализован ее упругий изгиб. На трубу на расстоянии от жесткой заделки надето кольцо с тензометрическими датчиками, которое в ходе эксперимента упиралось в установленный над ним неподвижный шток электрического пресса. После чего осуществлялось фотографирование упруго-изогнутой трубы со стороны наклеенных на ее боковую образующую крестовых маркеров, расположенных вдоль центральной оси трубы. Следующим шагом отсоединялся груз, прикрепленный к свободному концу трубы, начинался процесс ее колебаний, в ходе которого были получены данные с тензометрических датчиков, на основе которых рассчитывалась величина усилий, действующих на трубу в месте установки кольца в процессе ее колебаний.

Фотографии крестовых маркеров обрабатывались в программном пакете ТЕМА Motion, в результате чего были получены координаты маркеров, которые аппроксимировались уравнением полинома (1).

Значения полученных коэффициентов полинома использовались для расчета величины усилия, действующего на трубу в месте установки кольца с тензометрическими датчиками в момент резкого смещения ее конца. Относительные отклонения рассчитанных по разработанной математической модели и полученных в результате эксперимента значений усилий при различных расстояниях от жесткой заделки до места крепления кольца находятся в пределах 5% и представлены в таблице 1.

В результате конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS смещения концов магистральных трубопроводов наружными диаметрами от 820 мм до 1420 мм и их центрирования так же были получены относительные отклонения величин усилий до 5% от результатов расчетов.

**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° 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%.**

Для оценки величин коэффициентов полинома, описывающего пространственное положение центральной оси трубы, осуществлялись ее упругий изгиб путем жесткой заделки и приложения усилия с противоположного конца, лазерное сканирование ее поверхности и фотографирование со стороны ее боковой образующей с крестовыми маркерами.

В программном комплексе SpatialAnalyzer осуществлялась обработка полученных в результате сканирования координат облака точек трубы путем создания соосных с ее центральной осью цилиндров с шагом 5 см, высотой 5 мм и диаметром не менее наружного диаметра трубы, аппроксимирования точек, входящих в каждый из цилиндров, уравнением эллипса и вычислением координат точек центров каждого из полученных эллипсов, которые являются точками центральной оси трубы. Путем аппроксимирования найденных координат точек уравнением полинома (1) были определены его коэффициенты.

Коэффициенты полинома (1) определены с помощью координат крестовых маркеров, полученных в результате обработки их фотографий в программном пакете ТЕМА Motion.

Величины коэффициентов полиномов, полученных путем обработки облака точек лазерного сканирования трубы и фотографий крестовых маркеров, наклеенных на ее боковую образующую, использовались для расчета по разработанной математической модели значений усилий, прикладываемых к трубе в выбранных сечениях для устранения резкого смещения

ее конца и его центрирования (рисунок 5). В результате относительное отклонение рассчитанных усилий на основе коэффициентов полиномов, полученных по двум методам, составило менее 5% (таблица 2).

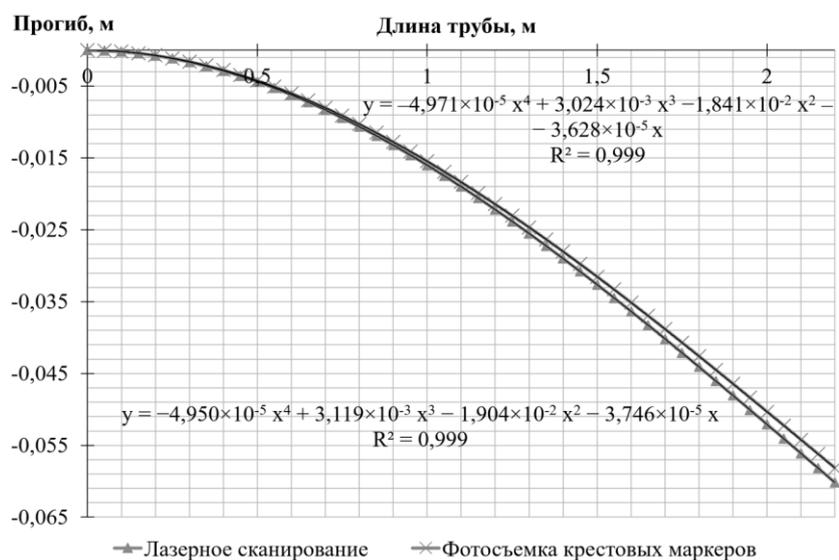


Рисунок 5 – График прогиба исследуемой трубы

Лазерное сканирование изолированной трубы с заранее созданными неровностями покрытия осуществлялось с последовательным уменьшением угла сканируемого сектора трубы от  $180^\circ$  с шагом  $30^\circ$ . Сравнением величин усилий, необходимых для центрирования конца трубы и устранения ее резкого смещения, рассчитанных на основе облаков точек ее поверхности, полученных при каждом из углов сканируемого сектора, было установлено, что оценка усилий с относительной погрешностью до 5% осуществляется при угле не менее  $120^\circ$  при наличии неровностей изоляционного покрытия (таблица 3).

Технико-экономическая эффективность разработанного способа ремонта магистральных трубопроводов обеспечивается годовой экономией затрат равной 8,1 млн руб. при 40 ремонтах

в год, полученной применением устройств для фиксации и центрирования концов трубопровода взамен трубоукладчиков. При условии стоимости лазерного сканера 4 млн руб., стоимость двух устройств фиксации и центрирования должна составлять 7 140,57 тыс. руб. для обеспечения их окупаемости за два года. При этом чистый дисконтированный доход к концу срока их эксплуатации составит 14 164,48 тыс. руб.

### **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 фиксации 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. 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 (№ 1855 Перечня ВАК от 12.07.2021).

2. 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 (№1922 Перечня ВАК от 27.04.2022).

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

3. Shammazov, I. Improving the method of replacing the defective sections of main oil and gas pipelines using laser scanning data / I.A. Shammazov, **E.R. Dzhemilev**, D.I. Sidorkin // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 13. – №. 1. – P. 48. DOI: 10.3390/app13010048

4. **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, B.N. Mastobaev, A.K. Gumerov // Neftyanoe Khozyaystvo - Oil Industry. – 2022. – № 10. – P. 78–82. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-10-78-82.

*Публикации в прочих изданиях:*

5. **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.

6. **Джемилев, Э.Р.** Разработка техники и технологии для повышения эффективности ремонта магистральных трубопроводов с заменой их дефектных участков / **Э.Р. Джемилев**, И.А. Шаммазов // Бурение и нефть. – 2023. – № S2. – С. 122.

7. 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.

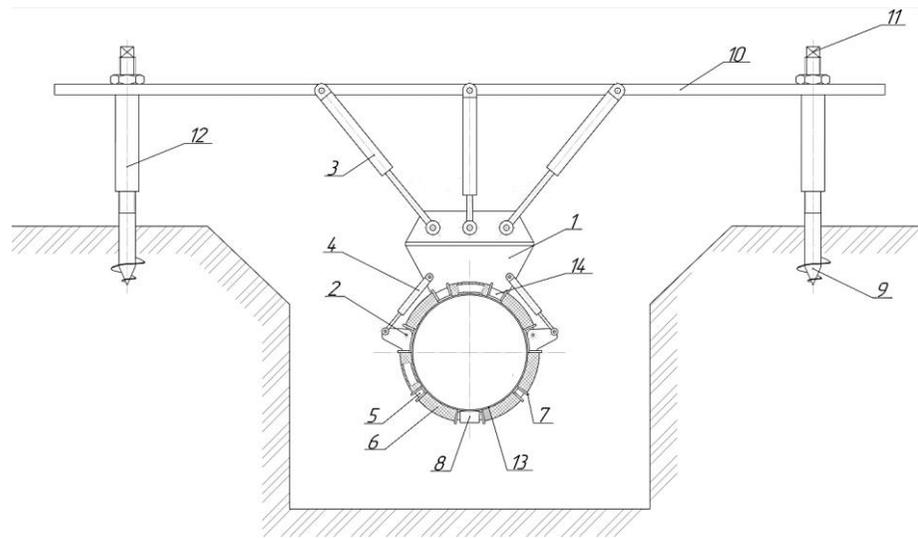
*Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:*

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662609 Российская Федерация. Программа для расчета эксплуатационных нагрузок на устройства фиксации 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».

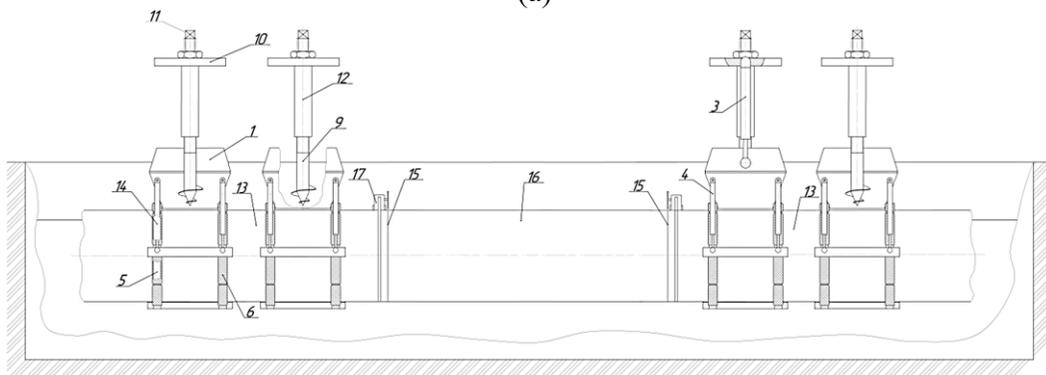
9. Патент на полезную модель № 216133 U1 Российская Федерация, МПК F16L 1/10, F16L 1/026. Устройство фиксации и центрирования концов трубопровода при его ремонте с вырезкой дефектного участка : № 2022130640 : заявл. 25.11.2022 : опубл. 17.01.2023 / Д.И. Сидоркин, И.А. Шаммазов, **Э.Р. Джемилев** ; заявитель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

10. Патент № 2791795 C1 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".

11. Патент № 2763096 C1 Российская Федерация, МПК F16L 1/10, F16L 1/026. Устройство фиксации 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».



(a)



(б)

Рисунок 1 – Устройство фиксирования и центрирования концов трубопровода при вырезке его дефектного участка: а – вид спереди; б – вид сбоку; 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; 15 – сечение разрезания трубопровода; 16 – вырезаемый участок трубопровода; 17 – машинка для резки труб

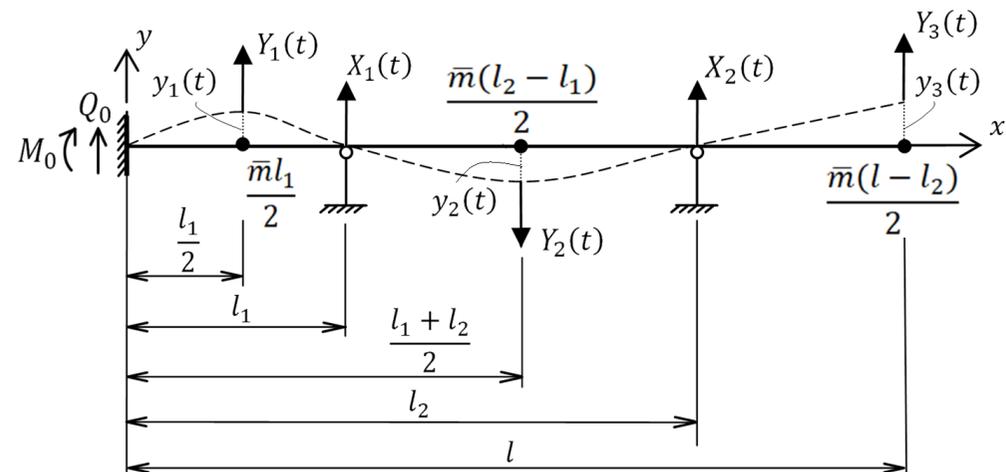


Рисунок 2 – Расчетная схема трубопровода в процессе его колебаний в результате резкого смещения концов после его разрезания

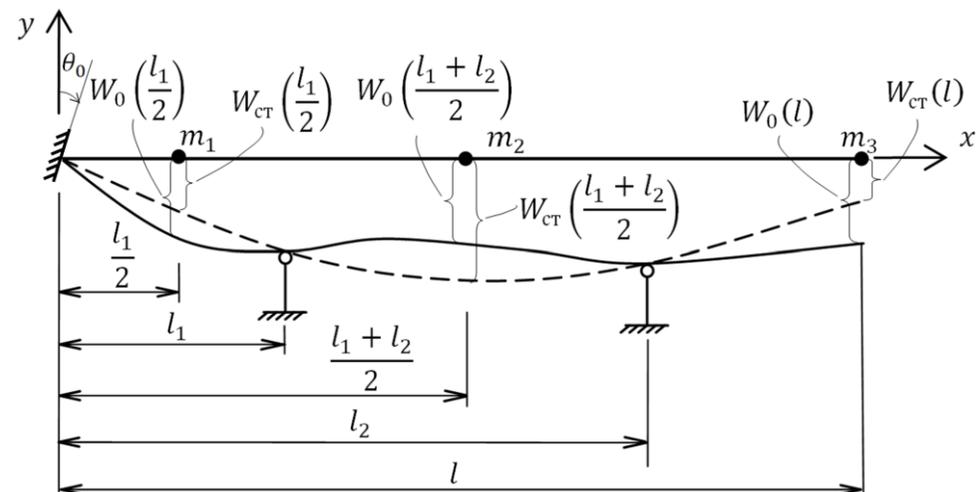


Рисунок 3 – Схема перемещений трубопровода в процессе его колебаний:  $W_0(x)$ ,  $W_{cm}(x)$  – прогибы участка трубопровода в начале и в конце процесса колебаний его конца, соответственно

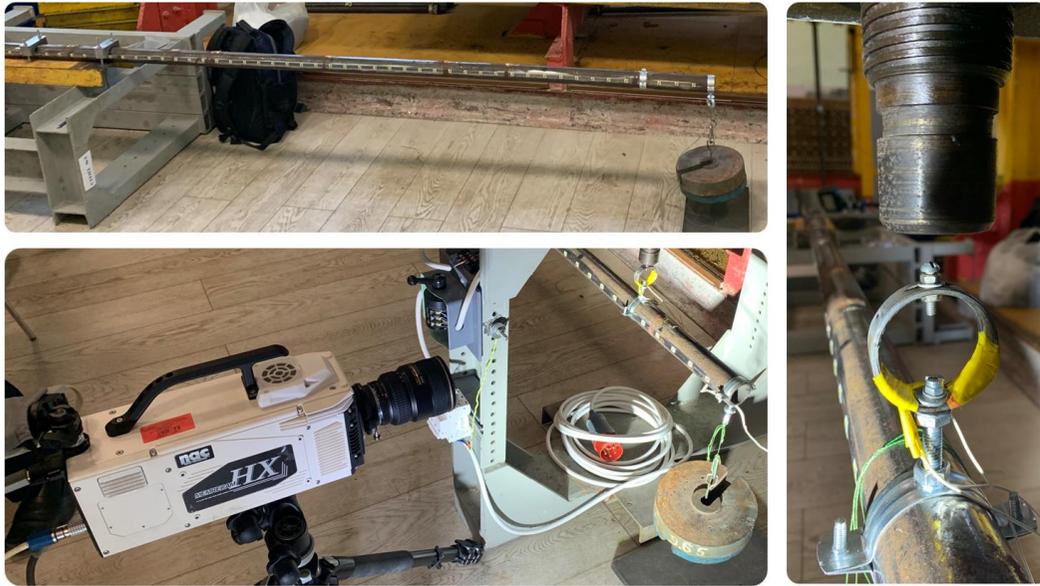


Рисунок 4 – Экспериментальный стенд для исследования зависимости величины усилия, необходимого для устранения резкого смещения конца трубы, от пространственного положения ее центральной оси

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований величины усилий, необходимых для устранения резкого смещения конца трубы

Длина трубы, м	Расстояние от заделки до кольца, м	Максимальная величина усилия $X_n(t)$ , Н	Рассчитанная величина усилия $X_n(t)$ , Н	Относительное отклонение, %
2	1,05	-609,07	-629,047	3,176
	1,15	-565,103	-567,939	0,499
	1,3	-469,764	-481,522	2,442
	1,35	-439,595	-450,259	2,368
1,9	0,85	-749,179	-761,13	1,570
	0,95	-635,618	-667,508	4,777
	1,05	-599,424	-606,608	1,184
1,85	1,15	-527,333	-539,391	2,235
	0,85	-725,43	-752,422	3,587
	0,95	-628,565	-639,155	1,657
	1,05	-563,895	-584,267	3,487
	1,15	-533,033	-549,046	2,917

Таблица 2 – Результаты расчета величин усилий по данным лазерного сканирования и фотосъемки крестовых маркеров

Параметр	Лазерное сканирование	Фото крестовых маркеров	Относительные отклонения, %
Длина трубы 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
Длина трубы 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
Длина трубы 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
Длина трубы 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

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований зависимости рассчитанных величин усилий от наличия неровностей изоляционного покрытия трубы и угла ее сканируемого сектора

Параметр	Величина				
	Угол сканируемого сектора	360° (без изоляции)	180°	150°	120°
$X_{1n}$ , Н		80,616	81,806	82,864	84,186
$X_{2n}$ , Н		-509,92	-518,523	-526,174	-535,735
$P_1$ , Н		49,256	49,320	49,376	49,448
$P_2$ , Н		14,94	14,931	14,923	14,913
Максимальное относительное отклонение, %		–	1,659	3,089	4,819