

На правах рукописи



ПОПКОВ АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА
РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТАЛЬНЫХ МУФТ
ДЛЯ РЕМОНТА НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2011

Диссертация выполнена
в филиале ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта

Научный руководитель: кандидат технических наук
Юрий Викторович Александров

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Игорь Юрьевич Быков

кандидат технических наук
Владислав Николаевич Лисин

Ведущая организация: ОАО «Северные магистральные
нефтепроводы»

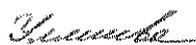
Защита состоится 22 октября 2011 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета.

Автореферат размещен на интернет-сайте Ухтинского государственного технического университета www.ugtu.net в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан 20 сентября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, профессор



Н.М. Уляшева

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Надежность функционирования нефтегазопроводов тесно связана с работоспособностью труб и напрямую зависит от их несущей способности, которая в процессе длительной эксплуатации неуклонно снижается по причине развития дефектного состояния.

Кардинальным методом восстановления работоспособности нефтегазопроводов является вырезка дефектных участков с заменой их на новые трубы. Однако по мере роста числа дефектов объемы вырезки и замены труб достигают размеров, неприемлемых по материально-техническим затратам. В связи с этим, в мировой практике ремонта трубопроводов широкое развитие получили ремонтные технологии, не требующие вырезки дефектных участков, а в ряде случаев и остановки транспортировки продукта.

Среди таких технологий выделяются методы ремонта с применением полноохватных муфтовых конструкций, на которые возлагается задача остановки развития дефектов труб с повышением несущей способности дефектного участка до уровня, обеспечивающего дальнейшую надежную и безопасную эксплуатацию трубопровода.

Из множества решений по муфтовым технологиям достаточно широкое распространение получили методы ремонта с применением стальных оболочек, устанавливаемых на дефектные участки труб. Этому в значительной мере способствовали идентичность материалов муфты и трубы, хорошая свариваемость элементов муфты между собой и со стенкой трубопровода, долговечность муфтовых стальных конструкций в условиях эксплуатации.

Расчетно-экспериментальным исследованиям в области ремонта трубопроводов с применением муфт посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых и исследователей, среди которых: И.И. Велиюлин, Л.А. Гобарев, А.И. Егоренков, Б.А. Клюк, А.С. Кузьбожев, А.Г. Мазель, С.С. Митрошин, Н.Г. Пермяков, А.Н. Платонов, К.Е. Ращепкин, С.В. Романцов, Е.Л. Чеглаков, В.В. Харионовский, А.М. Шарыгин, В.М. Шарыгин, М.С. Якубовская, Кифнер Д., Мехью В., Хок Брайн, Фоли Н., Шмидт Д., Келти П. и др.

Анализ известных работ показывал отсутствие методик оценки работоспособности стальных неприварных обжимных муфт установленных на слой твердеющего композита, объединяющих адекватные расчетные зависимости и результаты испытаний полномасштабных объектов типа «труба-муфта». Не решены вопросы оценки эффективности муфт по повышению ресурса дефектных труб при их циклическом нагружении.

Кроме этого, не достаточно исследовано влияние технологических элементов

монтажа муфт, в том числе использования слоя композита на силовую эффективность.

В связи с этим, экспериментально-расчетное обоснование повышения несущей способности и остаточного ресурса дефектных участков трубопроводов на базе применения известных и усовершенствованных конструктивно-технологических решений по их ремонту с помощью сварных стальных муфт является актуальной научно-практической задачей.

Цель работы: Обоснование работоспособности стальных неприварных муфт с использованием разработанных методов оценки их силовой эффективности и полномасштабных испытаний отремонтированных дефектных труб.

Задачи исследования:

1. Разработать методику расчета коэффициента усиления муфтовых конструкций в зависимости от наличия и свойств материала, заполняющего зазор между муфтой и трубой;

2. Провести расчетную и экспериментальную оценку влияния толщины стенки муфты на ее силовую эффективность при ремонте трубопровода с трещиноподобным дефектом;

3. Разработать методику расчета прочностного ресурса отремонтированных муфтами труб с трещиноподобными дефектами при воздействии циклической нагрузки;

4. Провести полигонные, стендовые и лабораторные испытания конструкций стальных муфт для определения их работоспособности.

Научная новизна:

- Теоретически обосновано и опытно апробировано выражение для определения значения контактного давления между трубой и стальной обжимной неприварной муфтой с учетом параметров слоя заполнителя. Установлено, что толщина слоя заполнителя не влияет на коэффициент усиления муфты, если его модуль упругости более 400 МПа.

- Получено выражение для расчета остаточного ресурса труб с трещинами, отремонтированных обжимными муфтами, при воздействии циклической нагрузки. Установлено, что при равных значениях толщины стенки муфты и трубы (δ), стальная обжимная неприварная муфта повышает остаточный ресурс трубы в 14,3 раза при начальной относительной глубине дефекта $0,4 \cdot \delta$.

- Разработан критерий определения рациональной толщины стенки стальной обжимной неприварной муфты, основанный на равенстве кольцевых напряжений в дефектной и бездефектной зонах трубы с учетом контактного давления.

Защищаемые положения:

- Методы и результаты расчетных исследований коэффициента усиления муфт в зависимости от параметров трубы, муфты и свойств заполнителя.

- Расчетное обоснование толщины стенки муфты в зависимости от параметров дефекта.

- Методика расчета остаточного ресурса отремонтированных муфтами труб с трещинами в режиме циклического нагружения.

- Результаты оценки силовой эффективности неприварных усовершенствованных муфт, установленных на эпоксидный слой.

- Результаты стендовых и полигонных испытаний работоспособности приварных и неприварных стальных муфт.

Практическая значимость

Отдельные положения и рекомендации диссертационной работы были использованы при разработке трех нормативно-технических документов:

1. СТП 8828-167- 04 ООО «Севергазпром» (с 2008 г. ООО Газпром трансгаз Ухта, перераб. в 2011 г.) Ремонт дефектных участков газоконденсатопроводов диаметром 530÷1400 мм стальными сварными муфтами - Введ. 17.06.2004. – Ухта: ООО «Севергазпром» - 2004 г. – 34 с.

2. Рекомендации по оценке эффективности муфтовых технологий ремонта стресс-коррозионных дефектов магистральных газопроводов. Введ. 16.05.2006. - Ухта: ООО «Газпром трансгаз Ухта» - 2006. – 47 с.

3. Отраслевой стандарт СТО Газпром 2-2.3-522-2010 Инструкция по ремонту дефектных участков технологических трубопроводов газа компрессорной станции сварными стальными и стеклопластиковыми муфтами с резьбовой затяжкой. – Введ. 19.08.2011. – 56 с.

В рекомендациях приведен разработанный метод оценки прочностного ресурса труб с глубокими стресс-коррозионными трещинами и усиливающего эффекта сварных муфт, повышающих ресурс дефектных труб. В стандарте организации ООО «Севергазпром» приведены конструктивные параметры и элементы технологии монтажа разработанных обжимных неприварных муфт, рекомендуемых к использованию на магистральных газопроводах ООО «Газпром трансгаз Ухта».

В отраслевом стандарте СТО Газпром приведен разработанный метод расчета коэффициента усиления сварных обжимных муфт, их конструктивные параметры и способы установки на технологические трубопроводы газа компрессорных станций.

Ожидаемый экономический эффект, от внедрения результатов диссертационной работы, при планируемом количестве ремонтов технологических трубопроводов газ КС муфтами в количестве 100 шт. составляет 12,9 млн. руб. в год, а за десятилет-

ний период - 89,69 млн. рублей с учетом дисконтирования денежных потоков.

По материалам исследований разработано три устройства в соавторстве, защищенные патентами РФ, два из них касаются конструкции муфт для ремонта трубопроводов и один - устройства для измерения кривизны труб при ремонте.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: пятой Международной конференции «Обслуживание и ремонт газоконденсатопроводов», (г. Туапсе, 4 – 9 октября 2010 г.); научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников Ухтинского государственного технического университета (УГТУ), (г. Ухта, 2006, 2009, 2010 гг.); II научно-практической молодежной конференции: Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», (г. Москва, 6 – 7 октября 2010 г.); IV научно-практической конференции молодых специалистов ИТЦ ООО «Газпром трансгаз Ухта», (г. Ухта, 14-17 июня 2010 г.); Межрегиональном семинаре «Рассохинские чтения», УГТУ, (г. Ухта, 4-5 февраля 2010 г.); VI научно-практической конференции молодых специалистов и ученых филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ»-«Севернипигаз»: «Инновации в нефтегазовой отрасли -2009», (г. Ухта, 29 июня – 4 июля 2009 г.); восьмой Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов по проблема газовой промышленности России «Новые технологии в газовой промышленности», РГУНиГ им. И.М. Губкина, (г. Москва, 6-9 октября 2009 г.); 3-ей Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трубопроводного транспорта Западной Сибири», ТГНУ, (г. Тюмень, 28 мая 2009 г.); X Международной молодежной научно-практической конференции «Севергеозкотех-2009», УГТУ, Ухта, 18-20 марта 2009 г.; на семинаре-совещании «Повышение уровня надежности технической эксплуатации ЛЧ МГ и ГРС ООО «Газпром трансгаз Ухта», (г. Вологда, 15-19 ноября 2010 г.)

Публикации: по теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, из них - три в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ, 3 патента на полезные модели.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, содержит 150 страниц текста, 70 рисунков, 16 таблиц и список литературы из 102 наименований.

Содержание работы

Во введении охарактеризованы актуальность и значимость выбранной темы, степень ее разработанности, обозначено направление исследований.

В первой главе «Систематизация конструктивно-технологических решений по ремонту трубопроводов с применением полноохватных муфт» выполнен

анализ патентно-информационных источников по вопросам методов ремонта трубопроводов в отечественной и зарубежной практике с применением муфт различного типа. Предложена классификация муфтовых технологий трубопроводов, которая позволила систематизировать существующее многообразие конструкций и методов монтажа муфт (рисунок 1). Обзор показал, что наиболее часто применимыми на практике и наиболее привычными при установке для персонала, являются конструкции стальных муфт, что определило принцип выбора объектов для исследования.



Рисунок 1 – Классификация конструктивно-технологических решений по ремонту трубопроводов с применением муфт

Для исследований в рамках данной диссертационной работе выбрано четыре группы устройств: *c*, *e*, *g*, *h*.

Во второй главе «Расчетные положения по определению усиливающего эффекта сварных муфт без учета дефектного состояния трубы» предложен подход по определению силовой эффективности муфты коэффициентом усиления K_{yc} независимо от параметров защищаемого дефекта по одной из формул, встречающихся в работах Велиюлина И.И., Шарыгина А.М.:

$$K_{yc} = \begin{cases} p / (p - p_k), & (1) \\ \sigma_{кц} / \sigma_{кцм}, & (2) \\ p_{прм} / p_{пр}, & (3) \\ \Delta R_p / \Delta R_m, & (4) \end{cases}$$

где p , p_k , $p_{прм}$, $p_{пр}$ – внутреннее давление среды в трубопроводе (p), контактное давление между муфтой и трубой (p_k), предельное давление среды для трубы с установленной муфтой ($p_{прм}$), предельное давление среды для трубы в этом же сечении без муфты ($p_{пр}$), МПа; $\sigma_{кц}$, $\sigma_{кцм}$ – кольцевые напряжения в трубе без муфты ($\sigma_{кц}$) и с муфтой ($\sigma_{кцм}$), МПа; ΔR_p – изменение радиуса трубы под давлением вдали от муфты, м; ΔR_m – изменение радиуса трубы под давлением под муфтой, м.

Формулы (1) и (2) применяют для расчета K_{yc} , когда металл трубы и муфты деформируется в упругой стадии, формулу (3) при анализе предельного состояния конструкции «труба-муфта» (предел текучести металла или разрушение), а формулу (4) в процессе экспериментальных исследований при отсутствии тензометрии.

В результате решения задачи осесимметричного нагружения внутренним давлением среды цилиндрической оболочки (трубы), усиленной снаружи бандажом (муфтой) с учетом различных условий их взаимодействия по площади контакта (наличие воздушного зазора или промежуточного слоя, заполняющего зазор, с определенными свойствами при сжатии) получен ряд зависимостей, приведенных ниже.

При наличии радиального воздушного зазора Δ_k между трубой и муфтой напряжения $\sigma_{кцм}$ определяют по формуле:

$$\sigma_{кцм} = \frac{2 \cdot \Delta_k \cdot E}{(1 - \mu^2) D_n} + \frac{p \cdot D_n}{2(\delta + \delta_m)} - \frac{2 \cdot \Delta_k \cdot \delta \cdot E}{(1 - \mu^2)(D_n - 2\delta)(\delta + \delta_m)}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости трубной стали, МПа; μ – коэффициент Пуассона; D_n – наружный диаметр трубы, мм; δ – толщина стенки трубы, мм; δ_m – толщина стенки муфты, мм.

С целью учета деформационных свойств твердого заполнителя и повышенной относительной толщины стенки трубы и муфты, что характерно для труб категории В компрессорных станций (КС), используя решение задачи Ляме, получено выражение для контактного давления между слоем заполнителя и трубой.

Исходя из равенства радиальных перемещений на границах раздела сред конструкции «труба-заполнитель-муфта», получим следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} 2p + p_1(\mu \bar{R}_1^2 - \mu - \bar{R}_1^2 - 1) &= em[-2p_2 \bar{R}_2^2 + p_1(\mu_k \bar{R}_2^2 - \mu_k + \bar{R}_2^2 + 1)], \\ e[2p_1 + p_2(\mu_k \bar{R}_2^2 - \mu_k - \bar{R}_2^2 - 1)] &= n[p_2(1 + \bar{R}_3^2) + p_2(\mu \bar{R}_3^2 - \mu)] \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где p – внутреннее давление среды, МПа; p_1 , p_2 – контактные давления заполнителя

на трубу (p_1) и муфту (p_2); $\bar{R}_1, \bar{R}_2, \bar{R}_3$ - относительные значения радиусов - наружного радиуса трубы к внутреннему (\bar{R}_1); внутреннего радиуса муфты к наружному радиусу трубы (\bar{R}_2); наружного радиуса муфты к внутреннему (\bar{R}_3); $e = E/E_k$; E_k - модуль упругости при сжатии заполнителя, МПа; $m = (\bar{R}_1^2 - 1)/(\bar{R}_2^2 - 1)$; $n = (\bar{R}_2^3 - 1)/(\bar{R}_3^3 - 1)$; μ_k - коэффициент Пуассона заполнителя.

Вводя в систему уравнений (5) следующие обозначения:

$$A_1 = \mu \bar{R}_1^2 - \mu - \bar{R}_1^2 - 1; \quad A_2 = \mu_k \bar{R}_2^2 - \mu_k - \bar{R}_2^2 - 1;$$

$$B_1 = \mu_k \bar{R}_2^2 - \mu_k + \bar{R}_2^2 + 1; \quad B_2 = 1 + \bar{R}_3^2 + \mu(\bar{R}_3^2 - 1),$$

получим контактное давление на трубу $p_1 = p_k$:

$$p_k = \frac{2 \cdot p(e \cdot A_2 - nB_2)}{(A_1 - e \cdot m \cdot B_1)(e \cdot A_2 - n \cdot B_2) - 4m \cdot e^2 \cdot \bar{R}_2^2}. \quad (6)$$

Расчет по формуле (6) показывает, что контактное давление p_k в широком диапазоне изменения модуля E_k от 100 до 10000 МПа и толщины прослойки δ_k от 0,5 до 1,5 мм практически не изменяется для фиксированного значения δ_m (рисунок 2). При низких значениях E_k контактное давление, во-первых, сильно зависит от толщины δ_k , а во вторых, и это главное, резко снижается.

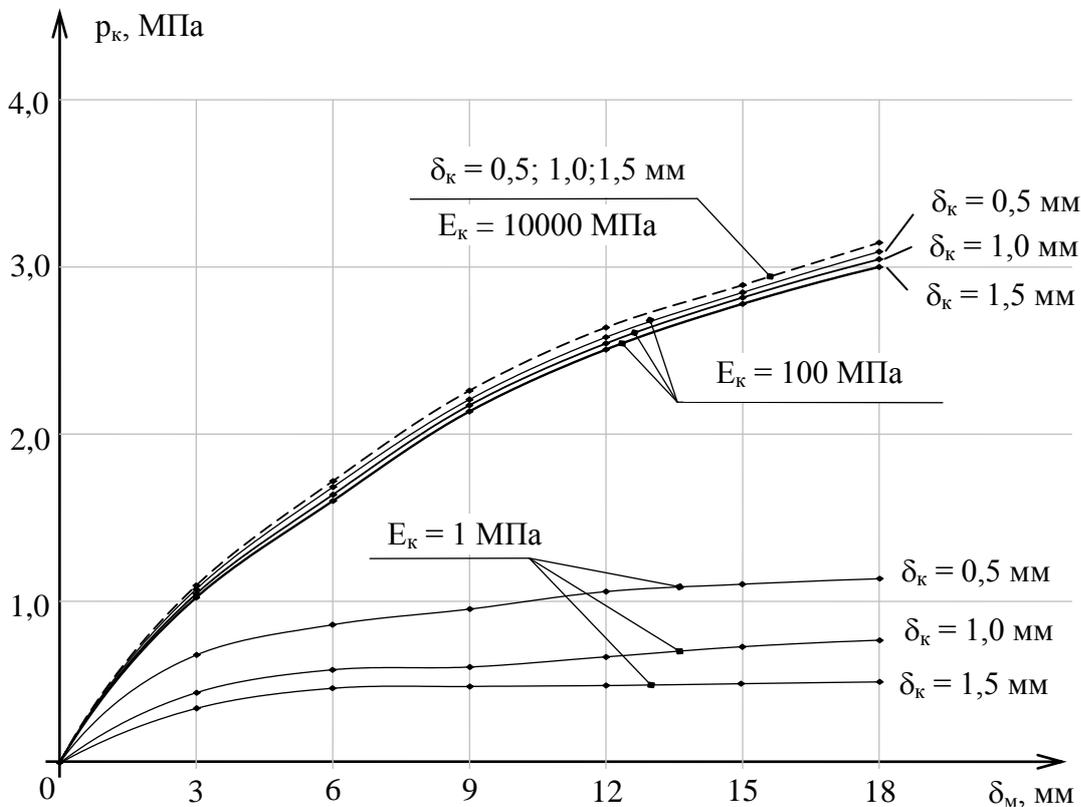
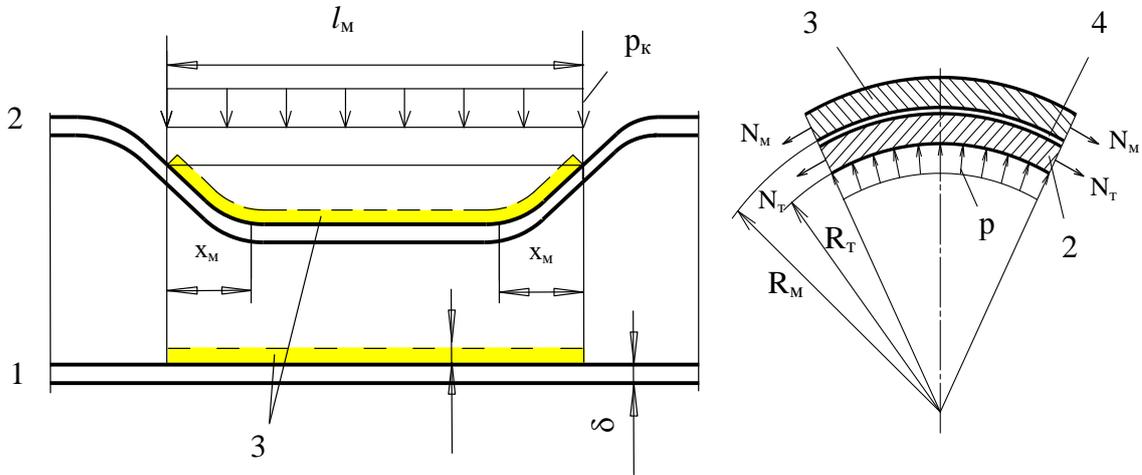


Рисунок 2 – Зависимость контактного давления p_k от толщины муфты δ_m для различных значений модуля упругости (E_k) и толщины (δ_k) заполнителя для трубы сечением $D_H = 1220$ мм, $\delta = 12,5$ мм

Рассмотренные выше методы расчета силовой эффективности муфт не учитывают краевого эффект в окрестности торцевых сечений муфты, где реализуется нелинейная зависимость между контактным давлением на трубу и радиальными перемещениями трубы и муфты (рисунок 3). В этих местах силовой эффект муфты существенно снижен.



1 - положение стенки трубы до нагружения; 2 - то же под нагрузкой; 3 – муфта; 4 – слой композита; p – давление среды в трубопроводе; p_k – контактное давление; R_M – радиус внутренней поверхности муфты; R_T – радиус внутренней поверхности трубы; N_T – окружное растягивающее усилие в трубе, N_M – окружное растягивающее усилие в муфте; δ - толщина стенки трубы; δ_M – толщина стенки муфты; x_M – участки краевого эффекта; l_M – длина муфты

Рисунок 3 – Расчетная схема взаимодействия муфты с участком трубопровод

Рассматривая осесимметричную задачу, получаем формулу усредненного значения контактного давления p_k :

$$p_k = \frac{\kappa_\beta \cdot \gamma_1 (p - p_{\text{ост}})}{\kappa_\Delta + \gamma_1 \left(1 + \frac{2\delta}{R_M}\right) \frac{\delta}{\delta_M}}, \quad (7)$$

где $\kappa_\beta = 1 - [1 + e^{-\beta \ell_M} (\sin \beta \ell_M - \cos \beta \ell_M)] (2 \cdot \beta \cdot \ell_M)^{-1}$ - безразмерный коэффициент учета краевого эффекта муфты, м; $\beta = 1,285 / \sqrt{R_T \cdot \delta}$ - параметр оболочки, м^{-1} ; $p_{\text{ост}}$ - остаточное давление среды при установке муфты, МПа; γ_1 - коэффициент условий заземления концов трубы, равный значению: $(1 - \mu^2)$ - для подземной прокладки и $(1 - 0,5\mu)$ - для надземной прокладки; $\kappa_\Delta = E \cdot \delta \cdot \delta_K / E_K \cdot R_B^2$ - коэффициент влияния слоя заполнителя.

Зависимость контактного давления p_k от модуля упругости полимерной прослойки E_K при следующих исходных данных: $D_H = 1220 \text{ мм}$, $\delta = 12 \text{ мм}$, $\ell_M = 0,6 \text{ м}$; $p_{\text{ост}} = 0$; $\gamma_1 = 0,91$ (при $\mu = 0,3$); $\delta / \delta_M = 1,0$; $p = 5,4 \text{ МПа}$; $\delta = 12 \text{ мм}$; $R_B = 598 \text{ мм}$; $\beta = 5,1 \text{ м}^{-1}$; $\kappa_\beta = 0,945$; $E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, показывает, что эффективность муфты, определяемая

давлением p_k , существенно зависит от модуля упругости E_k в диапазоне от нуля до 100 МПа, а при $E_k > 400$ МПа давление p_k возрастает незначительно и практически не зависит от толщины слоя заполнителя, например композита (рисунок 4).

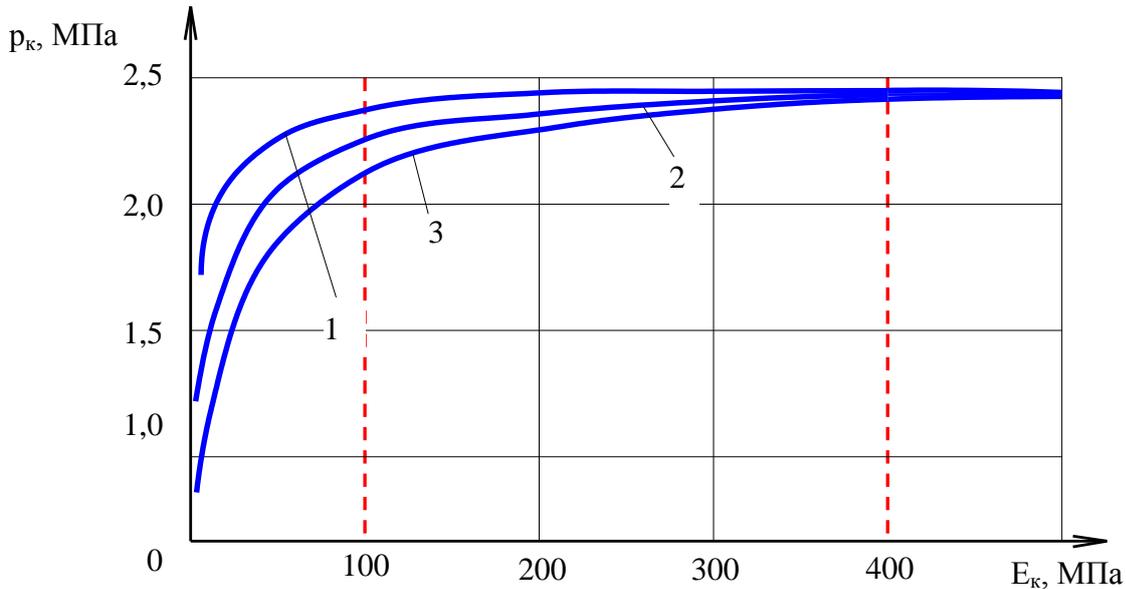


Рисунок 4 – Графики зависимости контактного давления p_k от модуля упругости E_k слоя композита для различной его толщины δ_k : 1 мм (1), 2 мм (2), 4 мм (3)

В третьей главе «Расчетная оценка эффективности обжимной муфты с учетом формы дефектов стенки трубы» выполнен расчет рациональной толщины стенки муфты в зависимости от глубины дефекта и разработана методика расчета прочностного ресурса отремонтированных муфтами труб с трещиноподобными дефектами при воздействии циклической нагрузки.

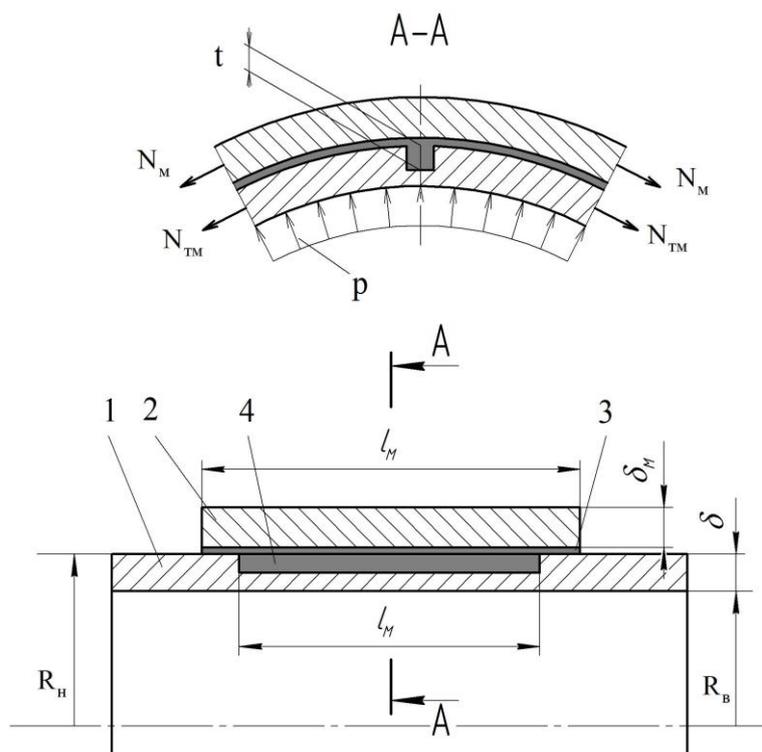
Критерием выбора толщины муфты является равенство кольцевых напряжений при воздействии внутреннего давления на систему «труба-муфта» в неповрежденной трубе вдали от муфты с дефектом и дефектной стенке трубы по остаточной толщине (рисунок 5):

$$\frac{N_{TM}}{\delta_{ост} \cdot l_0} = \frac{N_T}{\delta \cdot l_0} = \frac{p \cdot R_B}{\delta} = \frac{(p - p_k) R_B}{\delta_{ост}}, \quad (8)$$

где N_{TM} – усилие, действующее в трубе под муфтой в кольцевом направлении, Н; l_0 – единичная длина трубы, мм; N_T – усилие, действующее в трубе вдали от муфты; $\delta_{ост} = (\delta - t)$ – остаточная толщина стенки трубы, мм; t – глубина дефекта, мм.

Используя выражение (7) для контактного давления p_k , получим формулу для расчета рациональной толщины стенки муфты δ_m , принимая $k_\beta = 1$:

$$\delta_m \geq \frac{p \cdot \delta \cdot (1 + 2\delta/R_m)}{\gamma_1(p - p_{ост})/(1 - \delta_{ост}/\delta) - p(k_\Delta + \gamma_1)}. \quad (9)$$



1- труба; 2 – муфта; 3 – слой композита; 4 – трещиноподобный дефект, заполненный композитом

Рисунок 5 – Расчетная схема трубы с дефектом, защищенным муфтой

Зависимость толщины муфты δ_m от значений остаточной толщины трубы $\delta_{ост}$ при следующих исходных данных: $D_H = 1220$ мм, $\delta = 12$ мм, $p = 5,4$ МПа, $p_{ост} = 0$, $\gamma_1 = 0,91$ показывает (рисунок 6), что с ростом толщины $\delta_{ост}$ (со снижением глубины дефекта) оптимальная толщина δ_m быстро убывает, причем с увеличением параметра k_Δ (снижением модуля E_k) толщина δ_m заметно возрастает с уменьшением остаточной толщины стенки трубы $\delta_{ост}$.

Важным фактором надежной эксплуатации магистральных нефтегазопроводов является достаточный прочностной ресурс труб, определяющий срок их службы. Самыми опасными дефектами, ограничивающими этот срок, являются длинные продольные трещины, главным образом, стресс-коррозионного типа. Развитие данных трещин до критической глубины, вызывающей разрушение трубы, можно связать с количеством циклов переменной нагрузки – внутреннего давления, а имея фактические данные в виде годовых диаграмм его изменения, можно определить остаточный срок эксплуатации трубы с трещиной.

Для анализа роста трещин от начальной глубины до заданной, в том числе критической, используется известная зависимость Паррриса-Эрдогана:

$$\frac{dt}{dN_{II}} = c(\Delta K)^n, \quad (10)$$

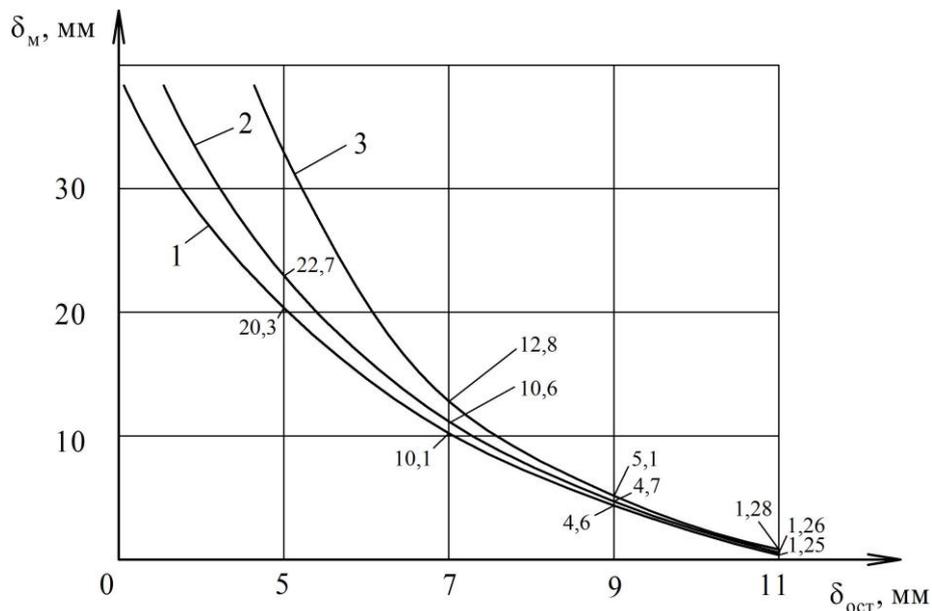


Рисунок 6 – Зависимость оптимальной толщины муфты δ_M от остаточной толщины стенки трубы для различных значений параметра κ_Δ : 0,035 (1); 0,1 (2); 0,3 (3)

где $\frac{dt}{dN_{II}}$ - скорость развития трещины по глубине, мм/цикл; N_{II} – количество циклов;

n, c – константы материала трубы, ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений, $\text{Па}\sqrt{\text{мм}}$.

Интегрируя зависимость (10), с разделением переменных t и N_{II} , получим формулу для определения количества циклов N_{II} , приводящих к критической глубине трещины от известной начальной глубины:

$$N_{II} = \frac{(\bar{t}_H^{1-0,5n} - \bar{t}_c^{1-0,5n})}{2^{n-1} \cdot (n-2) \cdot (1+6 \cdot \bar{t}^2)^n} \cdot \frac{\delta^{1-0,5n}}{c \cdot \Delta \sigma^n}, \quad (11)$$

где $\bar{t}_H = t_H / \delta$ – относительная начальная глубина трещины; δ - толщина стенки трубы, мм; t_H – начальная глубина трещины (средневзвешенная), мм; $\bar{t}_c = t_c / \delta = (1,23 \cdot p_T - \Delta p) / (1,23 \cdot p_T - \Delta p \cdot M^{-1})$ – относительная критическая глубина трещины; Δp - изменение внутреннего давления в цикле (при отнулевом цикле $\Delta p = p$ – для трубы; $\Delta p = p - p_K$ – для трубы с муфтой), МПа; $M = \sqrt{1 + (0,8 \cdot \ell_{\text{деф}}^2) / (D_H \cdot \delta)}$ - коэффициент Фолиаса; D_H – наружный диаметр трубопровода, мм; $\ell_{\text{деф}}$ - длина дефекта, мм; t_c - критическая глубина трещины, приводящая к разрушению стенки трубы одним циклом нагрузки, мм; $\Delta \sigma = \Delta p (D_H / 2\delta - 1)$ - изменение кольцевых напряжений в цикле, МПа.

Для трубных сталей в режиме циклического нагружения при использовании размерностей [Н, мм] и константы $n = 2,66$ значение $c = 2 \cdot 10^{-12}$. Для оценки усиливающего эффекта муфты также используется формула (11) с изменением двух параметров $\Delta \sigma$ и \bar{t}_c .

Графики зависимости логарифма числа циклов $\lg N_{ц}$ нагрузки в режиме $0 \div p_{раб}$ от относительной глубины трещины \bar{t} показывают «живучесть» труб диаметром 1220, 1420 мм с различной изначальной глубиной трещины $\bar{t}_н$ (рисунок 7).

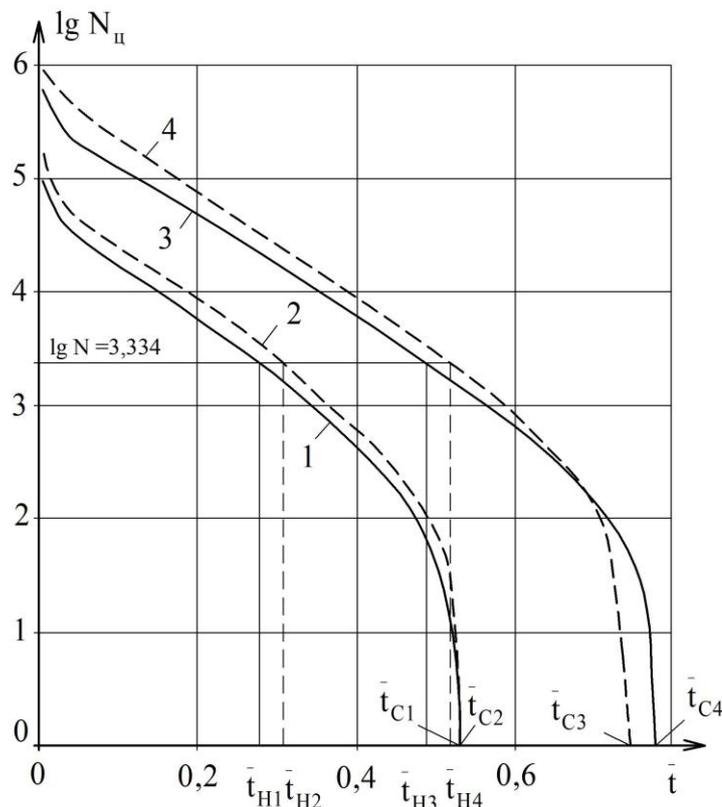


Рисунок 7 – Зависимость логарифма числа циклов $\lg N_{ц}$ от относительной глубины \bar{t} трещины без муфты (1, 2) и с муфтой (3, 4) для труб диаметром 1420 мм (1, 3) и 1220 мм (2, 4); $\bar{t}_{н1} - \bar{t}_{н4}$ - значения начальной глубины дефекта, при которой ресурс трубы с трещиной составляет 30 лет; $\bar{t}_{с1} - \bar{t}_{с4}$ - критические значения глубины трещин

Применение муфты существенно увеличивает число циклов. Так, при начальной глубине $\bar{t}_н = 0,4$ ($t = 6,6$ мм) ресурс трубы диаметром 1420 мм с дефектом составляет 440 циклов. Сварная муфта увеличивает число циклов до значения 6270 циклов или в 14,3 раза.

Общий характер очертания ресурсных кривых указывает на рост эффективности муфт с возрастанием начальной глубины трещин.

В четвертой главе «Экспериментальное обоснование усиливающего эффекта стальных муфт на дефектных трубах» методами полигонных, лабораторных и стендовых испытаний показана работоспособность сварных муфт, установленных на дефекты труб, вырезанных из действующих газопроводов диаметром 530-1420 мм. Испытания проводились в пять этапов.

На первом этапе были испытаны экспериментальные муфты трех типов, установленных на стресс-коррозионные дефекты трубы $D_n = 1420$ мм, $\delta = 12$ мм: тип А - приварная с гарантированным зазором, заполненным маслом, тип Б - неприварная

обжимная с болтовой затяжкой и тип В - неприварная обжимная, состоящая из двух полумуфт, соединенных приварными пластинами. Несмотря на достаточно высокие значения k_{yc} (таблица 2) при давлении среды $p=7,4$ МПа муфты типа А, Б не нашли практического применения ввиду сложности в изготовлении, а испытания муфты В были продолжены после упрощения конструкции - приварные пластины заменили сваркой продольных кромок полумуфт встык. Цель испытаний *на втором этапе* – определение k_{yc} с учетом элементов технологии монтажа муфты. На объекте испытаний - трубе $D_n = 1220$ мм, $\delta = 12$ мм были нанесены дефекты длиной $l_{деф} = 1000 - 1050$ мм, глубиной $t_{max} = 9,0 - 10,5$ мм, шириной 3,5 мм, допускающие разрушение трубы под муфтой. Дефекты ремонтировались тремя муфтами В с разными элементами технологии (B_1, B_2, B_3).

Таблица 2 – Коэффициенты усиления стальных муфт

Тип муфты	Метод установки	Промежуточный слой между муфтой и трубой	Коэффициент усиления	
			Расчет	Эксперимент
А	Приварка	Трансформаторное масло под давлением 0,3 МПа	1,68	1,47-1,79
Б	Болтовая затяжка	Эпоксидный компаунд	1,34-2,04	1,61
В	Накладка полумуфт с приваркой пластин	Эпоксидный компаунд	1,42	1,39

Муфта B_1 устанавливалась без приварки к трубе, без слоя композита, путем однократного прижатия полумуфт двумя гидравлическими цепными зажимами с последующей сваркой полумуфт. Муфта B_2 устанавливалась также без композита, но путем прижатия нижней полумуфты за счет использования сварочных прихваток и пошагового изгиба полумуфты по поверхности трубы. Муфта B_3 устанавливалась на эпоксидный клей при однократном прижатии и сварки кромок полумуфт. Результаты испытаний на предельную нагрузку доказали преимущество силовой эффективности муфты B_3 (таблица 3).

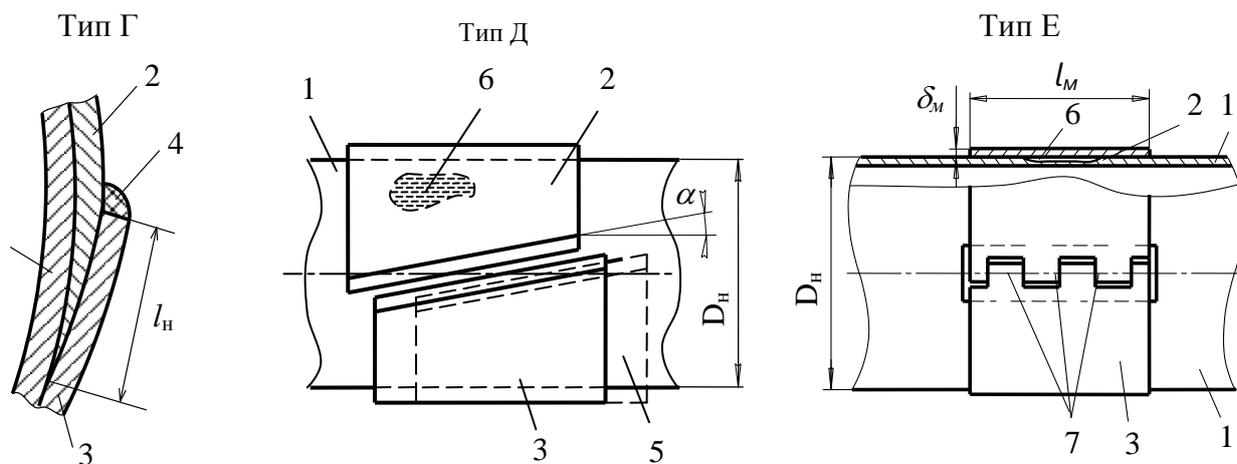
Таблица 3 – Коэффициент усиления k_{yc} муфт B_1, B_2, B_3

Муфта	Разрушающее давление, МПа		Коэффициент k_{yc} усиления при разрушающем давлении	Место очага разрушения трубы
	Экспериментальное с муфтой	Без муфты		
B_1	5,25	4,41	1,19	под муфтой
B_2	5,87	3,11	1,89	под муфтой
B_3	>9,9	3,70	>2,68	вне муфты

Расчетные значения разрушающего давления для нее составили $p_{разр\ min} = 6,44$ МПа с использованием формулы (1), $p_{разр\ max} = 14,53$ МПа – с использованием формулы $k_{yc\ max} = (\delta_m + \delta_{ост}) / \delta_{ост}$.

Основным недостатком муфт типа В являются повышенные затраты времени, связанные с подгонкой и подготовкой свариваемых продольных кромок полумуфт в процессе их монтажа в сложных трассовых условиях, поэтому были созданы усо-

вершенствованные конструктивные решения по сварным обжимным муфтам, включающие операции подгонки и подготовки кромок полумуфт при их монтаже (рисунок 8).



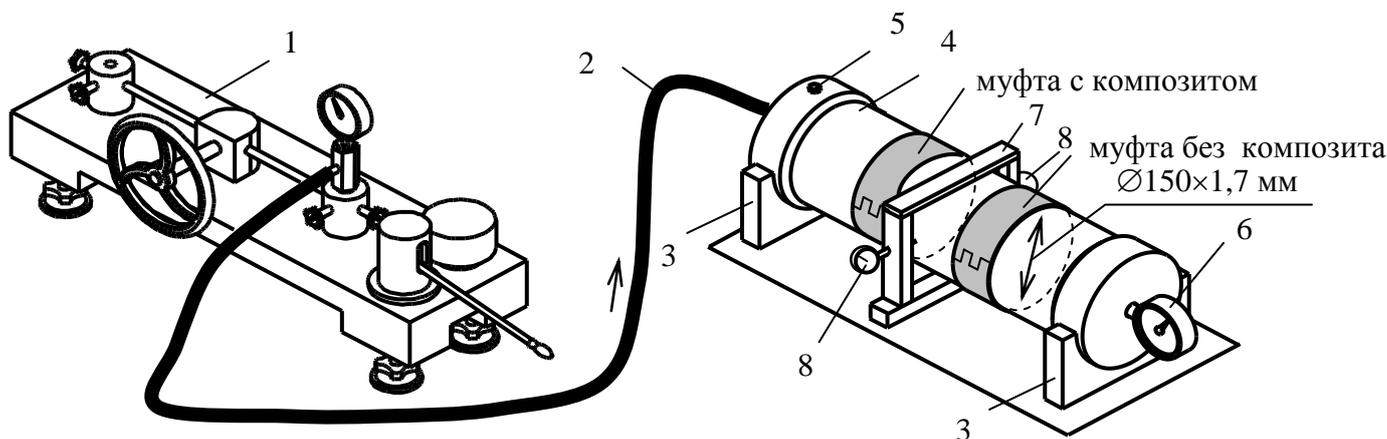
1 – труба; 2 – верхняя полумуфта; 3 – нижняя полумуфта; 4 – сварной шов;
5 – первоначальное положение нижней полумуфты; 6 – дефект на трубе;
7 – выступ-впадина

Рисунок 8 – Конструктивные схемы усовершенствованных муфт: со скошенными кромками (тип Г), с наклонными кромками (тип Д), с П – образными выступами и впадинами (тип Е)

В представленных трех конструкциях (Г, Д, Е) неизбежный разброс длины окружности ремонтируемой трубы компенсируется за счет пологого утонения кромки верхней полумуфты 2, в пределах которого отогнутая кромка нижней полумуфты 3 приваривается к верхней швом 4 (муфта Г) или за счет выполнения продольных стыкуемых кромок полумуфт 2, 3 под углом α к оси трубы, позволяющим за счет их взаимного перемещения регулировать зазор между кромками под сварку (муфта Д), или за счет выполнения торцевых участков стыкуемых полумуфт 2, 3 в виде взаимодействующих выступов и впадин 7, свариваемых швами окружного направления (муфта Е). Конструкции защищены патентами РФ.

С целью проверки работоспособности усовершенствованных муфт типа Г, Е на третьем этапе были проведены лабораторные испытания, для чего была изготовлена модель трубного образца сечением $D_n = 150$ мм, $\delta = 1,7$ мм, длиной $\ell = 600$ мм (рисунок 9). Размеры муфт – длина $\ell_m = 60$ мм, толщина стенки $\delta_m = 1,9$ мм. Обе муфты выполнены идентичными: в одном разъеме полумуфты соединялись сваркой по схеме муфты Г, в противоположном – по схеме муфты Е, отличие состоит в наличие или отсутствии композитного промежуточного слоя (металлополимер «Монолит +»).

Дефект под муфтами – канавка вдоль образующей трубы длиной $\ell_{\text{деф}} = 50$ мм, глубиной $t=0,5\delta$, шириной 0,5 мм. Перед сваркой полумуфты обжимали инвентарным обжимным устройством, создающим усредненное контактное давление



1- ручной гидропресс; 2 – подводящая линия; 3 – стойка; 4 – труба; 5 – пробка;
6 – манометр; 7 – рамка; 8 - индикатор часового типа
Рисунок 9 – Конструкция стенда для испытания муфт

2,0 - 2,5 МПа. Силовой эффект определяли по формуле $k_{yc} = \Delta R_p / \Delta R_m$, где ΔR_p и ΔR_m – радиальные перемещения трубы вдали от муфты (ΔR_p) и в середине длины муфты (ΔR_m). Давление в модели поднимали до $p = 6,5$ МПа.

В результате получили $k_{yc} \geq 1,66$ (без композита), $k_{yc} = 1,56$ (с композитом). Более эффективной оказалась муфта без композита за счет более интенсивного обжатия при установке давлением $p_k = 2,5$ МПа. Однако, муфта с композитом обеспечила более равномерное обжатие трубы.

На четвертом этапе испытывали муфту Г на многоцикловую и предельную нагрузку совместно со штатной приварной обжимной муфтой П2-2 одинаковой толщиной $\delta_m = 12$ мм на трубе $D_n = 530$ мм, $\delta = 12$ мм с двумя продольными дефектами, каждый длиной по 200 мм, усредненной глубиной $t = 0,55 \div 0,57\delta$, перекрытыми муфтой Г, установленной на композит и муфтой П2-2 с приваркой к трубе без композита.

Режим нагружения (давление) в цикле $p = 0 \div 7,4 \div 0$ МПа, количество – 11,8 тыс. циклов при перегрузочных испытаниях ($p_{max} = 18,3$ МПа). Результаты определения кольцевых напряжений в муфтах и соответствующие значения k_{yc} приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Значения кольцевых напряжений в муфтах (σ_m) и коэффициенты усиления k_{yc} с ростом числа циклов до 11779 шт. при давлении в цикле 0-7,4 МПа

Муфта	1 цикл		5100 циклов		7000 циклов		9150 циклов		11779 циклов	
	σ_m , МПа	k_{yc}								
с композитом, приварная	66	1,68	66	1,68	68	1,71	68	1,71	74	1,83
П2-2, приварная без композита	43	1,36	40	1,32	43	1,36	43	1,36	48	1,42

Циклическое и последующее предельное нагружения не нарушили целостность и герметичность объекта испытаний, что послужило дополнительным основанием для возможного применения данных муфт на трубопроводах газа компрессорных станций, поэтому *пятый этап* (стендовые испытания), провели на объекте смонтированном из элементов обвязки центробежных нагнетателей сечением $D_n=720$ мм, $\delta = 20$ мм, проработавших более 30 лет (рисунок 10). Материал элементов обвязки – сталь 20.



Рисунок 10 – Объект испытаний с установленными сварными муфтами

Продольные дефекты длиной 220 мм и усредненной глубиной $t = 7,7$ мм отремонтировали муфтами типа Г, Д с толщиной стенки $\delta_m = 0,5\delta = 10$ мм, установленными на металлополимер «Монолит+». Нагружали объект циклической нагрузкой в режиме $0 \div 7,4 \div 0$ МПа в количестве 15 тыс. циклов, а затем предельной нагрузкой $p_{max} = 16,5$ МПа, создававшей в трубе вне влияния муфт напряжения, равные пределу текучести стали 09Г2С ($\sigma_T \geq 280$ МПа). Методом электрической тензометрии определяли деформации трубы и муфт.

Обе муфты обеспечили одинаковое значение $k_{yc} = 1,5$, если брать усредненный показатель деформаций муфт по окружности. Но тензодатчики, расположенные на участке муфт, непосредственно над дефектом, показали повышенные значения деформаций стенки муфт по сравнению с другими участками по окружности. Расчет показал, что $k_{yc\ max} = 1,69$. Таким образом, в области дефекта трубы деформации муфты перераспределяются, при этом металл муфты над дефектом нагружается в большей степени, чем дает расчет без учета данного фактора.

В целом, муфты обеспечили надежную защиту дефектных участков трубы в процессе воздействия циклической и предельной нагрузок.

В пятой главе «Реализация результатов и экономическая эффективность работы» представлена оценка практической значимости и экономической целесообразности выполненных исследований. Практическая ценность заключается в со-

зданных в соавторстве патентах на полезные модели, по конструкциям муфт для ремонта трубопровода (два патента), устройству для измерения радиуса кривизны цилиндрической поверхности крупногабаритных деталей, а также трех нормативно-технических документов, разработанных с учетом результатов расчетно-экспериментальных исследований диссертационной работы. В содержание СТО Газпром 2-2.3-522-2010 вошли расчетные зависимости главы 2, конструктивные схемы муфт и элементы технологии ремонта из главы 4. В рекомендациях по оценке эффективности муфтовых технологий ремонта стресс-коррозионных дефектов магистральных газопроводов приведены методы расчета остаточного ресурса труб с трещинами из третьей главы диссертации. В стандарте ООО «Севергазпром» приведены конструктивные параметры и элементы технологии монтажа обжимных сварных муфт с применением композита из главы 4 диссертации.

Ожидаемый экономический эффект, от внедрения результатов диссертационной работы, при планируемом количестве ремонтов технологических трубопроводов газ КС ООО «Газпром трансгаз Ухта» муфтами в количестве 100 шт. составляет 12,9 млн. руб. в год, а за десятилетний период - 89,69 млн. рублей с учетом дисконтирования денежных потоков.

Основные выводы:

1. Предложена классификация существующих муфтовых конструкций для ремонта трубопроводов. Определены пути совершенствования и развития методов оценки эффективности стальных обжимных муфт.

2. Предложен и обоснован критерий силовой эффективности муфты – коэффициент усиления, рассчитываемый с использованием новых полученных зависимостей, учитывающих контактное давление и свойства заполнителя.

3. Предложена методика расчета рациональной толщины стенки муфты для обеспечения несущей способности дефектного участка трубы на уровне бездефектного. Получена зависимость остаточного ресурса отремонтированных труб с трещинами от начальной глубины дефекта, подтверждаемая результатами испытаний фрагмента трубопровода.

5. По результатам полигонных и стендовых испытаний доказана высокая работоспособность неприварных обжимных муфт с использованием эпоксидного заполнителя. Установлено, что заполнитель увеличивает коэффициент усиления по разрушающему давлению более чем в 2 раза.

6. Материалы исследования вошли составной частью в три ведомственных нормативно-технических документа ООО «Газпром трансгаз Ухта» и ОАО «Газпром», направленных на повышение эффективности ремонта трубопроводов стальными обжимными муфтами. Ожидаемый экономический эффект, при планируемом

ежегодном количестве ремонтов технологических трубопроводов газа КС муфтами в количестве 100 шт. составляет 12,9 млн. руб. в год.

Основные положения диссертации опубликованы

в следующих работах:

1. Александров Ю.В. **Опытнo-расчетная апробация ремонта магистральных газопроводов стальными сварными муфтами / Ю.В. Александров, А.М. Шарыгин, А.С. Попков // Газовая промышленность. – 2009. - № 12. - С. 44-47.**

2. Александров Ю.В. **Анализ силового взаимодействия стальных муфтовых конструкций с ремонтируемым участком трубопровода / Ю.В. Александров, В.М. Шарыгин, А.С. Попков // Газовая промышленность. – 2010. - № 12. - С. 54-57.**

3. Александров Ю.В. **Повышение надежности и экологической безопасности эксплуатации газопроводов путем совершенствования ремонтных технологий / Ю.В. Александров, В.М. Шарыгин, А.С. Попков // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2011. - №1. – С. 24-27.**

4. Попков А.С. Развитие муфтовых технологий ремонта газопроводов / X международная молодежная конференция «Севергеоэкотех-2009»: материалы конференции (18-20 марта 2009 г., Ухта): в 4 ч.; ч. 4. – Ухта: УГТУ, 2009. – С. 189-193.

5. Попков А.С. Особенности монтажа и расчета конструктивных параметров новых сварных муфт для ремонта трубопроводов / Эффективность освоения запасов углеводородов: Науч.-техн. сб. в 4 ч. Ч.3. Надежность и ресурс объектов транспорта газа / Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта. - Ухта, 2010. – С. 118 -130.

6. Попков А.С. Эффективность ремонта трубопроводов при использовании модернизированных конструкций сварных муфт / Тезисы докладов IV научно-практической конференции молодых специалистов ИТЦ ООО «Газпром трансгаз Ухта». – Ухта: 2010. - С.15.

7. Попков А.С. Муфтовые технологии ремонта – перспективный способ восстановления работоспособности трубопроводов /Сборник тезисов докладов VI научно-практической конференции молодых специалистов и ученых филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» -«Севернипигаз» «Инновации в нефтегазовой отрасли – 2009», Ухта (29 июня – 4 июля 2009 г.). - Ухта: филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ»-«Севернипигаз», 2009. – С.53.

8. Попков А.С. Оценка эффективности ремонта трубопроводов при использовании модернизированных конструкций сварных муфт/ «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность». - тезисы докладов II научно-практической

молодежной конференции (6-7 октября 2010 г.) – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2010. – С. 47.

9. Попков А.С. Мировые и отечественные тенденции развития муфтовых технологий ремонта трубопроводов / А.С. Попков, В.М. Шарыгин // Аналитик. – 2009. – Сб. научн.-техн. обзоров. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2010. – С. 27-66.

10. Бирилло И.Н. Расчетная оценка напряженно-деформированного состояния системы «труба-муфта» / И.Н. Бирилло, Ю.В. Александров, А.С. Попков // Наука в нефтяной и газовой промышленности. – 2010. - №4. – С. 2-6.

11. Попков А.С. Расчетная оценка силовой эффективности ремонта дефектных участков газопроводов стальными сварными муфтами / А.С. Попков, В.М. Шарыгин // Сборник научных трудов: Материалы 3-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трубопроводного транспорта Западной Сибири (28 мая 2009 г.) под общей ред. профессора, д.т.н Земенкова Ю.Д. – Тюмень: «Экспресс» 2009. – С. 86-88.

12. Попков А.С. Оценка влияния деформационных свойств металлополимерного связующего на эффективность ремонта трубопроводов сварными стальными муфтами / А.С. Попков, В.М. Шарыгин // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (13-15 апреля 2010 г.) в 3 ч., ч. II / под ред. Н.Д. Цхадая . – Ухта: УГТУ, 2010. – С. 8-13.

13. Шарыгин А.М. К вопросу об экспериментальной оценке ресурса труб газопроводов / А.М. Шарыгин, А.С. Попков, И.А. Базарова // «Рассохинские чтения», - материалы межрегионального семинара (4-5 февраля 2010 г.) / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2010. – С. 174 -177.

14. Пат. на полезную модель № 85212 RU, МПК F 16 L 55/18. Муфта для ремонта трубопровода / А.С. Попков, Р.В. Агинеи, В.М. Шарыгин, А.И. Филиппов, Ю.В. Александров, В.М. Непогожев. - №2009111629/22; Заявл 30.03.2009; Опубл. 27.07.2009. – Бюлл. №21.

15. Пат. на полезную модель № 60174 RU, МПК F16L 55/18. Муфта для ремонта трубопровода / В.М. Шарыгин, А.С. Попков, А.И. Филиппов и др. - №2006128883/22; Заявл. 08.08.2006; Опубл. 10.01.2007. – Бюл. №1.

16. Пат. на полезную модель № 95096 RU, МПК G 01 B 5/213. Устройство для измерения радиуса кривизны цилиндрической поверхности крупногабаритных деталей /А.С. Попков, Р.В. Агинеи, В.М. Шарыгин. - № 2010112881/22; Заявл. 02.04.2010; Опубл. 10.06.2010. – Бюлл. №16.

Подписано к печати 19.09.2011 г.

Заказ № 3581

Объем 1,5 п.л. Формат бумаги А5

Тираж 120 экз.

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

