

На правах рукописи

Самигуллина Лилия Гафуровна



**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО
РЕСУРСА НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ
ИСПЫТАНИЙ МИКРООБРАЗЦОВ**

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

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

Санкт-Петербург – 2020 год

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Щипачев Андрей Михайлович

Официальные оппоненты:

Наумкин Евгений Анатольевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» кафедра технологических машин и оборудования, профессор

Пояркова Екатерина Васильевна

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет», кафедра механики материалов, конструкций и машин, заведующий кафедрой

Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта

Защита диссертации состоится 29 сентября 2020 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.13 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. №1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 июля 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ФЕТИСОВ
Вадим Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

На территории России, в настоящее время, эксплуатируется более 250 тыс. км магистральных газонефтепроводов и свыше 500 тыс. км промысловых и технологических трубопроводов. С учетом того, что средний срок службы, на который рассчитывается амортизация газонефтепроводов составляет от 20 до 30 лет, для эксплуатируемых трубопроводов наблюдается тенденция к их износу и устареванию. Данная ситуация усугубляется тем, что нефтегазовые трубопроводы работают в сложных природно-климатических условиях при высоком уровне механических и технологических нагрузок, а также высокой коррозионной активности перекачиваемых продуктов. Эти причины обуславливают резкое ухудшение физико-механических свойств используемых сталей, что в свою очередь является причиной возникновения дефектов и повреждений трубопроводов.

Современный опыт эксплуатации линейных нефтегазопроводов показывает, что их устойчивая работа обеспечивается путем проведения технического диагностирования, определения технического состояния и оценки сроков дальнейшей безаварийной эксплуатации. Для этого требуется проведение оперативного контроля состояния поврежденности и напряженно-деформированного состояния металла трубопроводов с помощью испытаний микрообразцов, полученных щадящими способами воздействия на металл.

Таким образом, совершенствование процедур оценки технического состояния нефтегазопроводов и прогнозирования их остаточного ресурса по изменению прочностных характеристик материалов в процессе эксплуатации является актуальной научной задачей, решение которой имеет теоретическое и практическое значение.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами обеспечения прочности и устойчивости трубопроводов, проложенных в сложных инженерно-геологических условиях нашей страны занимались *В.Л. Березин, П.П. Бородавкин, Г.Г. Васильев, Ф.М. Мустафин, А.М. Шаммазов и др.* Вопросы оценки ресурса нефтегазопроводов, зарождения и развития дефектов

(повреждений), а также разработки способов диагностики и ремонта трубопроводов посвящены труды отечественных и зарубежных ученых: *Н.А. Махутов, Р.В. Агиней, Земенков Ю.Д., А.С.Кузьбожжев, В.В. Прутула, И.Р. Кузеев, В.В. Харионовский, Р. Копорік, К. Matochau др.*

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности ВАК РФ 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»: п.1 – «Напряженное состояние и взаимодействие с окружающей средой трубопроводов, резервуаров и оборудования при различных условиях эксплуатации с целью разработки научных основ и методов прочностного, гидравлического и теплового расчетов нефтегазопроводов и газонефтехранилищ»; п.7 – «Исследования в области ресурса трубопроводных конструкций, в том числе прогнозируемого при проектировании и остаточного при их эксплуатации».

Цель работы – теоретическое и экспериментальное обоснование методики оценки остаточного ресурса нефтегазопроводов по результатам испытаний микрообразцов.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Выполнить аналитический обзор состояния нефтегазопроводов, существующих методов оценки их технического состояния и остаточного ресурса;
2. Разработать математическую модель напряженно-деформированного состояния микрообразцов для оценки изменения прочностных характеристик трубопроводных сталей;
3. Выполнить экспериментальные измерения механических характеристик трубопроводных марок сталей;
4. Обосновать экспериментально-расчетный критерий, характеризующий степень повреждения стенки трубопровода;
5. Разработать методику оценки остаточного ресурса трубопровода по критерию степени повреждения стенки трубопровода.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является реализация комплексного подхода по обеспечению надежности при эксплуатации нефтегазовых трубопроводов путем совершенствования методик расчета остаточного ресурса.

Научная новизна работы:

1. Получены аналитические зависимости параметров напряженно-деформированного состояния, определяемых по диаграмме механических испытаний микрообразцов, от степени повреждения металла;

2. Обосновано применение интегрального критерия для оценки работоспособности и расчета остаточного ресурса нефтегазовых трубопроводов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложена методика проведения механических испытаний стальных микрообразцов с получением диаграммы нагружения;

2. Разработан алгоритм определения технического состояния и расчета остаточного ресурса нефтегазовых трубопроводов на основе оценки напряженно-деформированного состояния стенок трубопроводов;

3. Представлены рекомендации по применению технических средств для отбора микрообразцов для проведения испытаний;

4. Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению при проектировании и эксплуатации нефтегазовых трубопроводов, выполненных из углеродистых сталей.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовался комплексный способ исследований, включающий экспериментальные и теоретические методы исследований: анализ современного состояния теории, практики и патентных материалов; расчет внутренних напряжений в математической модели микрообразцов с применением программного комплекса Abaqus; проведение экспериментов на микрообразцах.

Положения, выносимые на защиту:

1) Зависимость уровня предварительного нагружения N (кН) и параметров диаграммы нагружения (F_m , F_e) микрообразцов из углеродистых сталей имеет линейный характер и может быть выражена уравнениями вида:

$$N = A_1 * F_m + B_1 \text{ и } N = A_2 * F_e + B_2;$$

2) Интегральный критерий технического состояния ΔS , определяемый по диаграмме нагружения микрообразцов как относи-

тельное изменение удельной работы разрушения, характеризует степень поврежденности стали от действия эксплуатационных нагрузок и позволяет оценить остаточный ресурс трубопровода.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического моделирования и подтверждается сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований с доверительной вероятностью не менее 0,95.

Апробация результатов

Основные положения диссертационной работы и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: III Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2016» (г. Екатеринбург, 2016 г.), XII Международная научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт - 2017» (г. Уфа, 2017 г.), XXXIV Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты» (г. Новосибирск, 2017 г.), XII Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика)» (г. Москва, 2017 г.).

Личный вклад автора заключается в сборе и систематизации статистических данных по эксплуатации нефте- и газопроводов; обосновании применения микрообразцов для оценки состояния трубопроводов; разработке математических моделей испытания микрообразцов и проведении экспериментальных исследований по их испытаниям; разработке методики оценки остаточного ресурса нефтегазовых трубопроводов и формулировке рекомендаций по применению оборудования для получения микрообразцов.

Публикации по работе

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 11 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 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему ци-

тирования SCOPUS.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, общим объемом 122 страницы печатного текста, содержит 25 таблиц, 45 рисунков, 3 приложения. Список литературы включает 122 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен аналитический обзор технического состояния эксплуатируемых газонефтепроводов, показано, что значительная их часть имеет износ порядка 50-70%. Для обеспечения требований безопасности длительно эксплуатируемых трубопроводов необходимо совершенствовать методы оценки технического состояния и определения расчетных значений времени достижения ими предельного состояния. Рассмотрены процессы, ухудшающие прочностные свойства стенок стальных трубопроводов в процессе их эксплуатации и методы определения физико-механических характеристик трубопроводных сталей. Было установлено, что в результате воздействия повреждающих производственных факторов могут происходить как процессы упрочнения материалов с потерей их пластических свойств, так и потери прочности в результате накопления дефектов и повреждений.

Выполнен анализ нормативной и методической базы по оценке текущего состояния и остаточного ресурса нефтегазовых трубопроводов. Было установлено, что преимущественно применяются два класса моделей – вероятностно-статистические, основанные на положениях теории вероятности и процедур статистической обработки данных, а также детерминированные, по результатам измерений физико-механических свойств. Выявлено, что большинство стандартных методов определения прочностных характеристик материалов, традиционно применяемых для контроля состояния трубопроводов, имеет определенные недостатки, основным из которых

является невозможность получения контрольных образцов требуемых размеров из действующих трубопроводов.

Решением проблемы может быть применение альтернативного метода оценки прочностных характеристик трубопроводных сталей - метод испытания микрообразцов (Small Punch Test – SPT), который позволяет получить диаграмму нагружения (рисунок 1).

На графиках можно выделить две характерные точки: точка E , соответствующая состоянию перехода от линейности к распространению пластической зоны по толщине образца, и точка M , соответствующая максимальной нагрузке, зафиксированной в момент начала разрушения.

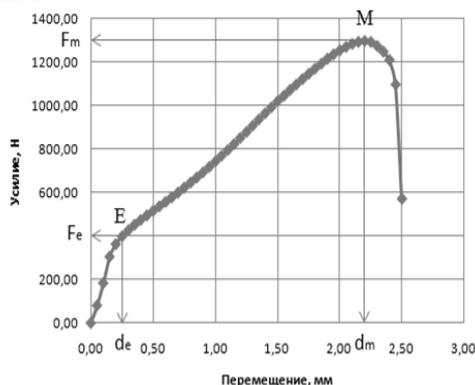


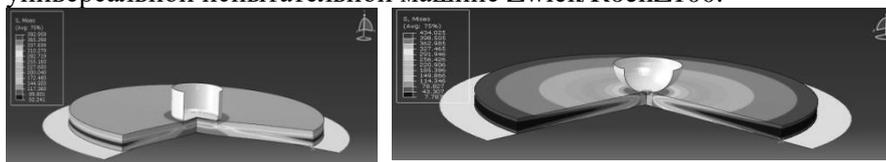
Рисунок 1 – Пример диаграммы испытания микрообразцов «Усилие-перемещение»

Для разработки экспериментальной методики проведения механических испытаний микрообразцов методом SPT проводилось предварительное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния микрообразца.

Во второй главе приведены результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния металлических микрообразцов при их испытаниях в лабораторных условиях. Решение численной задачи осуществлялось моделированием контактной деформации микрообразца (плоского металлического диска) специальным инструментом – «индентором» в программном комплексе Simulia Abaqus (версия 6.14) по справочным данным и ре-

зультатов предварительных лабораторных экспериментов (рисунок 2).

Для моделирования напряженно-деформированного состояния микрообразцов, как модельный экспериментальный материал, была выбрана сталь марки СТЗ, поскольку ее основные механические свойства, состав и структура изучены, она широко используется в промышленности, в том числе и при строительстве нефтегазопроводов. Механические испытания микрообразцов проводились на универсальной испытательной машине Zwick/RoellZ100.



а)

б)

Рисунок 2 – Эквивалентные напряжения по Мизесу при испытаниях микрообразцов в осесимметричной постановке: а) с цилиндрическим индентором; б) со сферическим индентором

Алгоритм проведения испытаний следующий: подкладное кольцо устанавливалось в машину, затем при помощи резьбы крепился индентор и испытуемый образец помещался на подкладное кольцо (рисунок 3, а). Материал подкладных колец и индентора – сталь У8, диаметр индентора 2,0 мм.



а)

б)

Рисунок 3 – Внешний вид образцов: а) исходное состояние; б) после проведения механических испытаний

Далее проводилось вдавливание индентора в образец со скоростью 0,2 мм/мин вплоть до разрушения испытуемого образца (рисунок 3, б). Частота дискретизации данных в ходе эксперимента составила 20 измерений в секунду. Испытательная машина измеряла

перемещение индентора в миллиметрах и приложенное усилие в ньютонах. По результатам измерений строилась кривая нагружения, которая соответственно представляет собой результат испытаний методом SPT (рисунок 4).

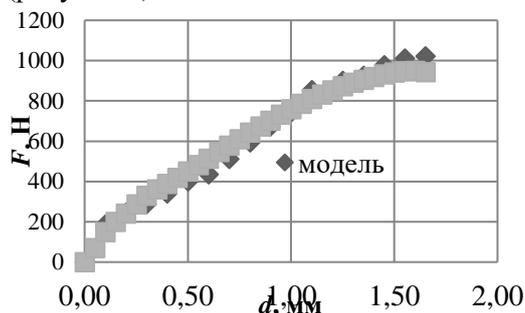


Рисунок 4 – Сравнение результатов моделирования напряженно-деформированного состояния и механических испытаний микрообразцов в координатах «Сила – перемещение» для стали марки СТЗ

Для оценки разработанной модели была проведена проверка ее адекватности для стали марки 10 с последующим сравнением результатов моделирования напряженно-деформированного состояния микрообразцов с экспериментальными значениями координат диаграммы нагружения (серия из 16 микрообразцов), результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение координат характерных точек

Параметры	$F_m, Н$	$d_m, мм$	$F_c, Н$	$d_c, мм$
Эксперимент	$2467,5 \pm 34,4$	$1,98 \pm 0,028$	$481 \pm 9,7$	$0,14 \pm 0,006$
Мат. модель	2501	2	490	0,135

Приведенные данные свидетельствуют об адекватности разработанной математической модели испытания микрообразцов методом SPT.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований механических свойств трубопроводных сталей микрообразцовым методом. Для испытуемых материалов указанные прочностные характеристики, полученные в ходе испытаний на растяжение в лабораторных условиях, достаточно близки по своим значениям и приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики испытываемых углеродистых сталей

Марка стали	Допускаемые напряжения $[\sigma]_{20}$, МПа	Предел пластичности σ_{τ} , МПа	Предел прочности σ_b , МПа
СТ3	217	332	456
10	130	205	320
20	147	225	370

Стандартные цилиндрические образцы подвергались предварительному воздействию статической нагрузки растяжения и сжатия различной интенсивности, которая формировала различную поврежденность. После этого изготавливались микрообразцы, которые испытывались путем вдавливания индентора до полного разрушения. В ходе испытаний фиксировались параметры «нагрузка (ньютон) – перемещение (миллиметр)». Уровень статического нагружения варьировался так, чтобы расчетные значения эквивалентных напряжений в стальных образцах изменялись от допускаемых напряжений до значений, вызывающих пластические деформации, вплоть до состояния, предшествующего разрушению.

Для каждой марки стали методом SPT испытывались образцы с различной степенью поврежденности и полученные результаты подвергались сравнительному анализу друг с другом и образцом в исходном неповрежденном состоянии. После проведения всего массива испытаний строились диаграммы в координатах «усилие – перемещение». При анализе полученных диаграмм определялись параметры характерных точек: первая - усилие (F_m) и деформация (d_m) прочности, вторая - усилие (F_e) и деформация (d_e) текучести.

В соответствии с вышеизложенным проводились экспериментальные исследования углеродистых сталей: марки СТ3, марки 10 и 20, диаграммы нагружения которых приведены на рисунках 5-7.

Из рисунков видно, что предварительное нагружение сжимающей и растягивающей нагрузкой приводит к изменению параметров диаграмм нагружения, полученных при испытаниях SPT-методом. Обработкой экспериментальных данных с применением метода наименьших квадратов были получены линейные зависимости интенсивности предварительного нагружения (N , кН) от координат характерных точек F_m и $F_e(N)$ (таблица 3).

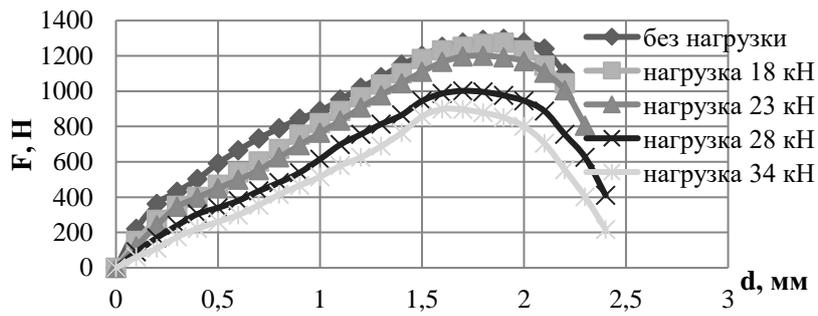


Рисунок 5 – Диаграмма нагружения микрообразцов в координатах «Усилие – перемещение» для стали марки СТЗ;

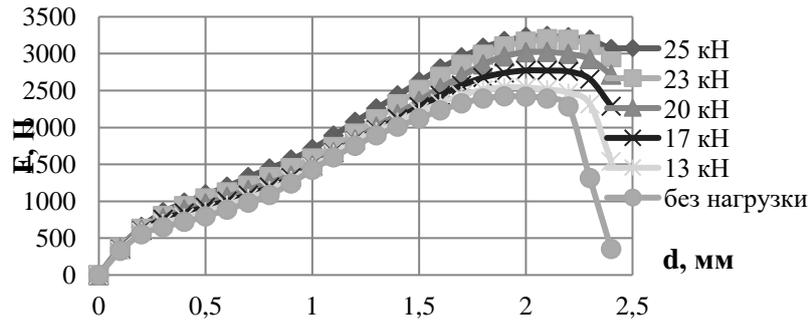


Рисунок 6 – Диаграммы нагружения микрообразцов в координатах «Усилие – перемещение» для стали марки 10.

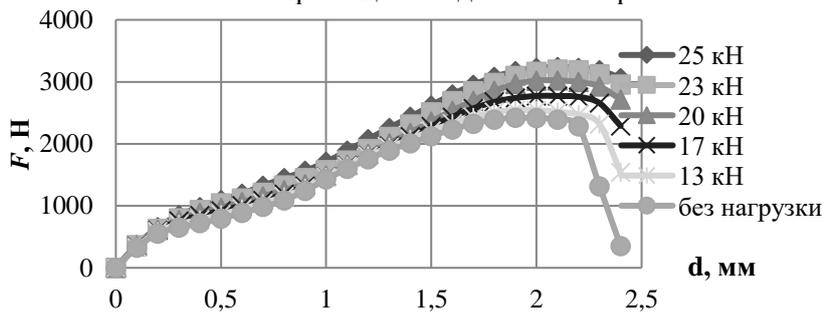


Рисунок 7 – Диаграммы нагружения микрообразцов в координатах «Усилие – перемещение» для стали марки 20.

Сжимающие нагрузки на трубопроводные стали, изученные на примере стали марки СТЗ, приводят к снижению показателей характерных точек, что говорит о протекании разупрочнения стали СТЗ вследствие изменения ее структуры.

Таблица 3 – Линейные зависимости интенсивности предварительно-го нагружения от характерных точек диаграмм нагружения

Марка стали	Линейная зависимость	Достоверность аппроксимации R^2
СТЗ	$N = -0,038 * F_m + 68,13$	0,97
	$N = -0,159 * F_e + 76,14$	0,96
10	$N = 0,0145 * F_m - 23,863$	0,98
	$N = 0,0422 * F_e - 9,03$	0,94
20	$N = 0,0137 * F_m - 25,903$	0,99
	$N = 0,0275 * F_e - 5,769$	0,98

В четвертой главе разработана методика оценки остаточного ресурса нефтегазовых трубопроводов с применением результатов испытания микрообразцов. Основой методики послужил общепринятый принцип «безопасной эксплуатации по техническому состоянию», подразумевающий в качестве параметров технического состояния применение прочностных показателей металлов, полученных прямыми измерениями, выраженных в числовой форме.

Критерии технического состояния трубопроводов были разработаны по результатам обработки диаграммы нагружения образцов путем оценки удельной работы по величине площади диаграммы, заключенной между кривой деформирования и осью абсцисс. Проведение сравнительных испытаний исходного образца и образца, подвергнутого предварительному нагружению, где происходит накопление повреждений, дает возможность определить энергию как разность площадей под соответствующими кривыми нагружения.

По диаграммам, приведенным на рисунках 5-7 методом трапеций приближенно были определены площади криволинейных фигур по формуле (1).

$$S = \frac{F_e \cdot d_e + (F_m + F_e) \cdot (d_m - d_e)}{2}, \quad (1)$$

где F_e , d_e , F_m , d_m – характерные точки диаграммы нагружения мик-

рообразцов.

Для каждой ступени нагружения микрообразцов расчетным методом, с использованием конечно-элементной модели (вторая глава), определялись эквивалентные напряжения по Мизесу. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Расчетные значения площади криволинейных фигур и эквивалентных напряжений

Марка стали	Статическая нагр. (N, кН)	Параметры диаграмм				Площадь фигуры (S)	Расчетные (экв.) напряжения, МПа
		F_m	d_m	F_e	d_e		
Растяжение							
Сталь 10	10	2467	1,98	481	0,14	2745,83	128,1
	14	2546	1,99	505	0,17	2819,33	178,3
	17	2778	2,02	655	0,21	3175,64	216,5
	20	3035	2,05	693	0,24	3457,03	254,7
	25	3241	2,11	755	0,28	3762,04	318,4
Сталь 20	14	3025	1,89	774	0,25	3211,93	145,2
	17	3104	1,9	802	0,26	3307,18	216,5
	20	3458	1,92	970	0,29	3749,47	254,7
	25	3769	1,97	1130	0,33	4203,63	318,8
	30	4032	2,01	1280	0,35	4632,96	382,1
Сжатие							
Сталь СТ3	15	1296	2,20	362	0,22	1482,28	191,1
	18	1275	1,91	350	0,26	1386,12	224,8
	23	1201	1,85	345	0,31	1243,89	287,2
	28	1002	1,72	305	0,36	943,66	349,7
	34	899	1,51	261	0,51	646,55	416,3

Полученные в предыдущих разделах зависимости характерных точек диаграммы от уровня предварительного нагружения дают возможность установить изменение работы разрушения образцов от уровня поврежденности испытываемых образцов. При этом уровень поврежденности принимается равным отношению действующей величины нагрузки на образец к пределу прочности металла. Оценка изменения площадей криволинейных фигур ΔS , полученных

в результате экспериментальных испытаний микрообразцов сталей марок СТЗ, 10 и 20 проводилась по формуле (2):

$$\Delta S = \frac{S_{м.ст i} - S_{м.ст 0}}{S_{м.ст 0}}, \quad (2)$$

где $S_{м.ст 0}$ – площадь диаграммы нагружения неповрежденного образца для соответствующей марки стали;

$S_{м.ст i}$ – площадь диаграммы нагружения образца со степенью поврежденности i (где $i=0 \dots 1$) для соответствующей марки стали.

Результаты расчетов по формуле (2) приведены в таблице 5 и на рисунке 8.

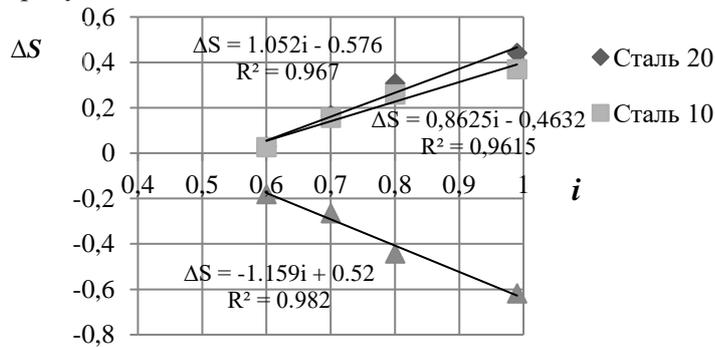


Рисунок 8 – Зависимости изменения площади диаграммы нагружения и степени поврежденности для сталей марок 10, 20 и СТЗ

Таблица 5 – Зависимость изменения площади ΔS и степени поврежденности для различных марок сталей

Степень поврежденности i	Изменение площади фигуры на диаграмме нагружения для исследуемых сталей ΔS		
	СТЗ	10	20
0,4	0,000	0,000	0,000
0,6	-0,065	0,027	0,029
0,7	-0,161	0,156	0,167
0,8	-0,363	0,259	0,308
1,0	-0,564	0,370	0,442

Приведенные выше данные свидетельствует о наличии линейной зависимости между степенью поврежденности, вызванной предварительным нагружением стальных микрообразцов и работой разрушения. Изменение работы разрушения, определяемое по диа-

грамме нагружения микрообразцов, может быть использовано в качестве критерия, характеризующего поврежденное состояние стенок трубопроводов, что может быть использовано для оценки ресурса.

При расчетном определении ΔS должна учитываться степень опасности трубопроводов, которую можно ассоциировать с тяжестью последствий при возникновении аварийных ситуаций (в соответствии с существующей классификацией) по формуле (3):

$$\Delta S_p = \Delta S(i) \pm s_m, \quad (3)$$

где $\Delta S(i)$ – изменение площади криволинейной фигуры, определяемой по диаграмме нагружения микрообразцов в исходном и текущем состоянии;

s_m – значение, ограничивающее верхний и нижний диапазон доверительного интервала изменений ΔS .

Степень опасности трубопровода определяется шириной доверительного интервала в соответствии с формулой (4):

$$s_m = k \cdot \sigma, \quad (4)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение, k – коэффициент интервальной оценки, который нормируется в зависимости от достоверности прогноза (таблица 6).

Таблица 6 – Дифференциация трубопроводов по степени опасности

Степень опасности	Нормативная классификация трубопровода				Довер. вероятность q
	Магистральный г/провод	Магистральный н/провод	распредел. газопровод	технологич. трубопр.	
Оч.высокая	I класс	I класс	категория Ia	категория I	0,99
Высокая	II класс	II класс	категория I	категория II	0,95
Средняя	-	III класс	категория II	категория III	0,90
Низкая	-	IV класс	низк. давлен.	категории IV-V	0,8

Оценка остаточного ресурса объекта в конкретных условиях эксплуатации проводится по динамике интегрального критерия технического состояния за период от начала эксплуатации до момента последнего контроля. Остаточный ресурс определяется моментом достижения прогнозируемого интегрального критерия своего предельного значения $\Delta S_{пред}$ по формуле (5):

$$t_{ост} = t_2 + \frac{\Delta S_{пред} - \Delta S_2}{\Delta S_2 - \Delta S_1} \cdot (t_2 - t_1) + k \cdot \sigma, \quad (5)$$

где $\Delta S_1, \Delta S_2$ – результаты испытаний микрообразцов в моменты вре-

мени t_1 и t_2 .

Алгоритм определения остаточного ресурса нефтегазовых трубопроводов с использованием интегрального критерия приведен на рисунке 9.

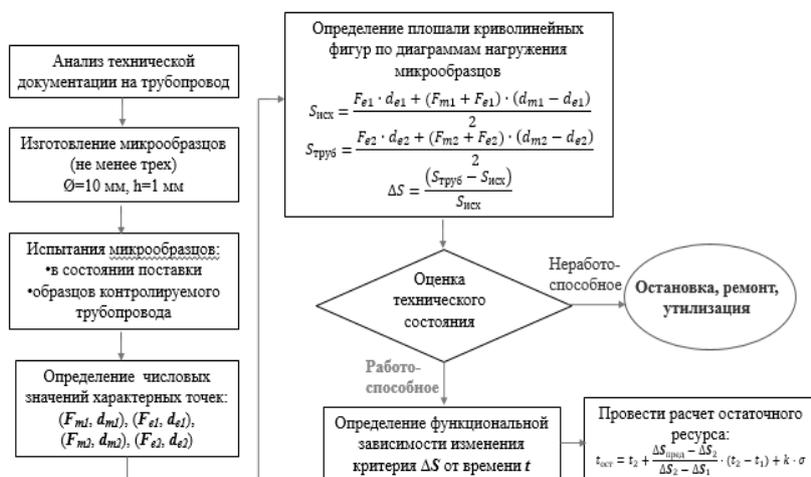


Рисунок 9 – Алгоритм определения остаточного ресурса

Таким образом, по результатам испытаний стальных микрообразцов, отобранных из эксплуатируемых трубопроводов, в сравнении с данными металла в исходном состоянии, дается оценка технического состояния и проводится прогноз работоспособности трубопровода. В заключительной части четвертой главы приведены практические рекомендации по выбору оборудования и отбору образцов трубопроводов для проведения испытаний методом SPT и определения остаточного ресурса трубопроводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа содержит теоретические и экспериментальные исследования, направленные на решение научной задачи по совершенствованию процедуры оценки технического состояния нефтегазопроводов и прогнозирования их остаточного ресурса по изменению прочностных характеристик материалов в процессе эксплуатации.

В ходе работы был проведен обзор существующих методов испытаний металлических образцов для диагностики состояния металла конструкций нефтегазового оборудования, рассмотрены основные и альтернативные методы оценки их физико-механических характеристик. Рассмотрены новые методы проведения испытаний, позволяющие оценить динамику изменений физико-механических характеристик сталей, используемых для оценки работоспособности нефтегазового оборудования и трубопроводов. Установлено, что существует необходимость развития альтернативных методов испытаний, которые позволят оперативно получать реальные характеристики трубных сталей в условиях эксплуатации.

Обоснована математическая конечно-элементная модель в программном комплексе SIMULIA ABAQUS. Результаты моделирования показали, что модель адекватно описывает уровень напряженно-деформированного состояния образцов, позволяет провести предварительную оценку возможности измерения физико-механических свойств образцов для низкоуглеродистой стали, и может быть использована в исследованиях для предварительного планирования лабораторных исследований и оценки свойств углеродистых сталей. Приведена постановка эксперимента с микрообразцами методом SPT, предложена подготовка оснастки и микрообразцов для проведения испытаний, дан метод обработки полученных экспериментальных данных с определением численных показателей усилия и деформации характерных точек прочности и текучести.

Разработана экспериментальная методика проведения механических испытаний микрообразцов (SPT – Small Punch Test). Экспериментально было установлено, что предварительные механические нагрузки приводят изменению поврежденности материалов. Было выявлено, что полученные значения контролируемых параметров (характерных точек текучести и прочности) при испытаниях микрообразцов, в зависимости от роста уровня предварительного нагружения исходных стандартных образцов, возрастали по линейной зависимости. Для определения степени поврежденности исследуемых трубопроводных сталей предложен интегральный критерий, определяемый по характерным точкам экспериментальной диаграммы нагружения микрообразцов.

Обоснована и разработана методика определения технического состояния и оценки остаточного ресурса нефтегазопроводов с применением интегрального критерия поврежденности, основанного на оценке напряженно-деформированного состояния стенок трубопроводов. Представлены рекомендации по применению технических средств для отбора микрообразцов для проведения испытаний. Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы к внедрению при эксплуатации нефтегазовых трубопроводов, выполненных из углеродистых сталей.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. Самигуллин, Г.Х. Оценка структурных параметров углеродистых сталей ультразвуковым методом / Г.Х. Самигуллин, **Л.Г. Самигуллина** // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – №10-4 (41). – С. 28-32.

2. Самигуллин, Г.Х. Оценка поврежденности металлических элементов нефтегазовых объектов микрообразцовым методом / Г.Х. Самигуллин, М.Н. Назарова, **Л.Г. Самигуллина**, Г.А. Юсупов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. - 2016. - № 6. - С.311-320.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования SCOPUS

3. Samigullin, G.H. Assessment of damage of metallic elements in oil and gas facilities using small punch test / G.H. Samigullin, A.M. Schipachev, **L.G. Samigullina**, V.G. Fetisov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. –Vol. 12, Number 21. – pp. 11583-11587.

4. Nikolaev A.K. Non-stationary operation of gas pipeline based on selection of travel / A.K. Nikolaev, G. H. Samigullin, V.G. Fetisov, **L.G. Samigullina** // IOP conference series: Materials Science and Engineering / - 2018. -Vol. 327. – 022074.

5. Samigullin, G.H. Control of physical and mechanical characteristics of steel by small punch test method / G.H. Samigullin, A.M. Schipachev, **L.G. Samigullina** // IOP Conference Series: Journal of

Physics: Conf. Series 1118, Complex Equipment of Quality Control Laboratories. – 2018. - 012038.

Публикации в прочих изданиях:

6. Самигуллин, Г.Х. Применение микрообразцового метода для оценки поврежденности металлических элементов / Г.Х.Самигуллин, М.Н. Назарова, **Л.Г. Самигуллина** // Физика. Технологии. Инновации: материалы конференции. – 2016. – С. 490-492.

7. Самигуллин, Г.Х. Оценка применения метода испытаний микрообразцов для определения остаточного ресурса технических объектов / Г.Х. Самигуллин, Д.С. Петров, **Л.Г. Самигуллина** // Приоритеты и научное обеспечение технологического прогресса: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – С. 124-127.

8. **Самигуллина, Л.Г.** Оценка применения метода испытаний микрообразцов для определения состояния трубопроводных сталей / Л.Г. Самигуллина, Д.С. Петров // Трубопроводный транспорт – 2017: Материалы XII Международной учебно-научно-практической конференции. – Уфа: УГНТУ, 2017. - С. 309-311.

9. Петраков, Д.Г. Последние достижения в области испытаний на изгиб малых образцов / Д.Г. Петраков, Д.С. Петров, **Л.Г. Самигуллина** // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: сборник статей XXXIV Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: ЦРНИ, 2017. – С. 87-93.

10. Петров, Д.С. Применение метода испытаний микрообразцов для мониторинга состояния металла нефтегазовых объектов / Д.С. Петров, **Л.Г. Самигуллина** // XII Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности»: Сборник тезисов. – Москва: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2017. – С. 455–170.

11. Самигуллин, Г.Х. Обеспечение безопасности и ресурса нефтегазовых трубопроводов на основе результатов испытаний микрообразцов: монография / Г.Х. Самигуллин, А.М. Щипачев, А.В. Клейменов, **Л.Г. Самигуллина.** - СПб: ЛЕМА. – 2020 – 101 с.