

На правах рукописи

АГИШЕВ ВАДИМ НАИЛОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ГАЗОПРОВОДОВ
С ДЕФЕКТАМИ ФОРМЫ ТРУБ**

Специальность 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»
(Нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа - 2005

Работа выполнена в Оренбургском государственном университете.

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Чирков Юрий Александрович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Хуснияров Мират Ханифович;
кандидат технических наук
Сагинбаев Рустам Хабирович

Ведущая организация ООО «Волго-Уральский научно-
исследовательский и проектный
институт нефти и газа»
(ООО «ВОЛГОУРАЛНИПИГАЗ»)

Защита состоится 1 апреля 2005 года в 14-30 на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан _____ 2005 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

М.М. Закирничная

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

В настоящее время в РФ эксплуатируется несколько десятков тысяч километров газопроводов, построенных в период с 1970 по 1980 годы. Несовершенство технологии строительства приводит к снижению качества строительно-монтажных работ, возникновению различных дефектов в металле стенки труб и снижению безопасности эксплуатации газопроводов. Длительные сроки эксплуатации газопроводов и непрерывно изменяющиеся параметры перекачки способствуют увеличению количества механических и развитию усталостных повреждений в металле труб, которые в свою очередь могут привести к авариям.

Аварии на газопроводах наносят непоправимый ущерб окружающей среде, экономике и нередко бывают причиной гибели людей. Примеров аварий, приводящих к значительному экологическому и экономическому ущербу, можно привести много, поскольку на газопроводном транспорте нефти и газа ежегодно происходит свыше 100 аварий с выходом продукта. В общем, по данным РАО «Газпром», дефекты, вызвавшие разрушения, составили: металлургические - 13,3 %; строительные - 23,9 %; эксплуатационные - 36,7 %; прочие - 26,1 %. По данным мировой статистики, только за последние 30 лет количество аварий в нефтяной и газовой промышленности возросло в три раза, а ущерб от них вырос в девять раз.

В настоящее время в результате диагностирования газопроводов установлено, что с учетом деформационного старения металла стенок труб дальнейшая эксплуатация газопроводов с дефектами формы труб возможна при условии обоснованно рассчитанного ресурса безопасной эксплуатации.

Наиболее опасные виды отказов газопроводов связаны с зарождением и развитием трещин в области дефектов под воздействием факторов эксплуатационного происхождения (статических и динамических нагрузок и коррозионной среды).

В данной диссертационной работе на основании анализа технического состояния газопроводов по результатам комплексной внутритрубной диагностики установлено, что основными типами дефектов являются коррозионные дефекты и дефекты формы, которые представляют собой наибольшую опасность при эксплуатации газопроводов, в условиях циклического нагружения.

Несмотря на большой объем опубликованных исследований в области увеличения долговечности и безопасной эксплуатации газопроводов, содержащих дефекты формы труб, ряд вопросов остается малоизученным, среди них можно выделить следующие:

1 Влияние циклического режима эксплуатации на работоспособность и безопасную эксплуатацию дефектных участков газопроводов, требует дальнейших экспериментальных исследований.

2 Несовершенство методов прогнозирования безопасной эксплуатации участков газопроводов, подвергнутых механическим повреждениям и эксплуатируемых под воздействием циклических нагрузок.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Повышение эффективности методов определения остаточного ресурса безопасной эксплуатации газопроводов с дефектами формы стенки труб, работающих в условиях статических и циклических режимов, на основе результатов неразрушающего контроля, расчетных методик и гидравлических испытаний дефектных труб.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1 Исследовать методику акустического неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния металла газопроводов с дефектами формы труб.

2 Определить остаточный ресурс безопасной эксплуатации газопроводов с дефектами формы труб при малоцикловой усталости по результатам метода автоциркуляций ультразвуковых импульсов (АУЗИ).

3 Определить эквивалентные режимы нагружения труб на основе анализа

режимов эксплуатации газопроводов.

4 Определить остаточный ресурс вмятин и гофр на основе циклического нагружения давлением труб с дефектами формы.

5 Разработать методику определения остаточного ресурса безопасной эксплуатации газопроводов с дефектами формы труб на основе результатов экспериментальных исследований метода АУЗИ и гидравлических испытаний.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

1 Установлены зависимости скорости распространения акустических волн от величины пластических деформаций металла и поврежденности металла в результате усталостного нагружения.

2 На основании результатов исследований метода АУЗИ разработан способ определения механических свойств металлов при пластическом деформировании.

3 Получена зависимость величины максимальных деформаций в области дефектов формы труб по результатам тензометрирования и метода АУЗИ.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Гидравлический стенд и предлагаемая методика гидравлических испытаний внедрены в УЭСП ООО «Оренбурггазпром» и позволили обосновать необходимость и сроки проведения ремонта участков газопровода с дефектами формы, тем самым повысить безопасность эксплуатации магистрального газопровода Ду 700 мм «Оренбург-Салават-Уфа».

Разработана методика оценки поврежденности металла дефектных участков газопроводов при циклических деформациях с прогнозированием остаточного ресурса безопасной эксплуатации.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1 Методика измерения величины пластических деформаций при сложном напряженно-деформированном состоянии металла газопроводов акустическими волнами.

2 Методика проведения гидравлических испытаний по результатам расчета количества эквивалентных циклов нагружений газопроводов.

3 Методика, позволяющая определять остаточный ресурс безопасной эксплуатации газопроводов с дефектами формы.

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены:

- на III Всероссийской научно-технической конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций» (Орск, 2002);

- Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы подготовки кадров для развития экономики Оренбуржья» (Оренбург, 2002);

- региональной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Оренбургской области (Оренбург, 2002);

- IV Международной научно-технической конференции «Диагностика оборудования и газопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред» (Оренбург, 2002);

- IV Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций» (Оренбург, 2005).

За разработанную методику оценки механических свойств металлов при пластическом деформировании в 2003 г. автор награжден дипломом лауреата научно-исследовательских работ молодых ученых и специалистов Оренбуржья. Также получено положительное решение о выдаче патента на изобретение «Способ оценки механических свойств при пластическом деформировании» (№2002110486/28(011033) от 19.04.2002 г.).

ПУБЛИКАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 9 печатных трудов и тезисов докладов.

ОБЪЕМ И СТРУКТУРА РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованных источников из 124 наименований, содержит 136 страниц машинописного текста, включая 44 рисунка, 10 таблиц, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, сформулированы цель и основные задачи исследования.

В первой главе проведен анализ условий эксплуатации газопроводов и дефектности металла газопроводов, по результатам которого выявлены основные дефекты газопроводов.

Установлено, что при длительной эксплуатации газопроводов наибольшей опасностью обладают дефекты формы, связанные с пластической деформацией, типа вмятин и гофр, так как в процессе повторно-статического изменения давления в структуре металла данных областей накапливается усталостное повреждение. Это приводит к потере пластичности металла, образованию трещин и выходу из строя газопроводов.

Таким образом, необходимо решение задачи выбора метода определения остаточного ресурса безопасной эксплуатации газопроводов с дефектами формы труб. В связи с этим проведен анализ ряда существующих методов. По результатам данного анализа выяснили следующее:

- универсальным неразрушающим методом контроля, применимым к контролю дефектного состояния металла труб, по ряду признаков является акустический метод АУЗИ;
- аналитические методы определения остаточного ресурса, хотя и считаются перспективными, но являются на данный момент сложными и дают приближенную оценку остаточного ресурса дефектных участков газопроводов в связи с тем, что не учитывают усталостное повреждение металла в области дефектов формы;
- метод определения остаточного ресурса дефектных участков газопроводов, использующий гидравлические испытания, достоверен при применении обоснованных режимов испытаний, которые должны учитывать реальное циклическое изменение внутреннего давления в эксплуатируемом газопроводе.

По результатам анализа различных методов определения остаточного

ресурса установлено, что на данный момент необходима разработка методики определения остаточного ресурса безопасной эксплуатации газопроводов с дефектами формы труб, учитывающей геометрические параметры дефектов формы, механические характеристики металла и величину усталостного повреждения металла в результате циклического изменения давления в процессе эксплуатации газопроводов.

Во второй главе приведена разработанная методика неразрушающего контроля металла, основанная на методе АУЗИ, использующего акустические волны. Преимуществом метода АУЗИ является возможность определения величины остаточной пластичности металла до зарождения и образования микротрещин.

При обработке метода АУЗИ получены экспериментальные зависимости изменения времени распространения акустических волн между фиксированной базой пьезопреобразователей датчика ультразвукового прибора от величины упругих и пластических деформаций металла и при малоциклового усталости металла.

Для установления зависимости изменения времени распространения акустических волн от структурных изменений, происходящих при пластической деформации металла, проведены экспериментальные исследования с растяжением плоских образцов из стали типа сталь 20 толщиной 2 мм, изготовленных по ГОСТ 1497-84. Образцы нагружали ступенчато, с шагом $0,2\sigma_T$ на разрывной машине ИР 5057-50 со скоростью 0,5 мм/мин.

При увеличении величины нагрузки на каждые $0,2 \sigma_T$ производили замер времени распространения акустических волн и удлинение образца. После достижения предела текучести металла образца замеры проводили после каждого относительного удлинения на 3 %.

По результатам экспериментов получена зависимость $(\Delta t/t_{\text{имп}}^0) = 0,05 \varepsilon$ изменения времени распространения акустической волны, от величины относительной деформации металла в шейке плоского образца, которая

приведена на рисунке 1. Здесь $t_{\text{имп}}^0$ – период акустического импульса в бездефектной зоне (эталон), $t_{\text{имп}}$ – период акустического импульса в зоне пластических деформаций, $\Delta t = t_{\text{имп}} - t_{\text{имп}}^0$.

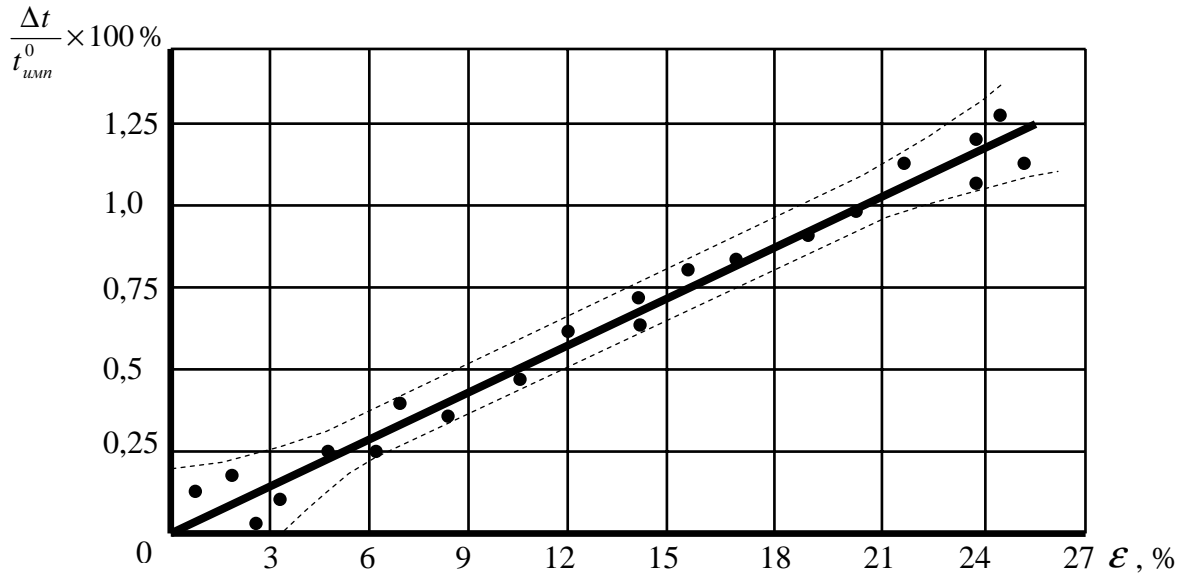


Рисунок 1 – Зависимость времени распространения акустической волны от величины деформации металла

Практический интерес имеют исследования изменения механических свойств металлов при малоциклового усталости, когда накопление повреждений связано с возникновением деформаций.

Усталость металлов является важнейшей проблемой прочности материалов в связи с задачей повышения долговечности и надежности конструкций, работающих под действием различных видов циклических нагрузок. Значение исследований усталости металлов трудно переоценить, если учесть, что более 80% всех разрушений носят усталостный характер.

Цель исследования заключалась в установлении зависимости изменения времени распространения акустических волн от усталости металла при малоциклового усталости. Испытания на малоциклового усталость проводили изгибом плоских образцов толщиной 2 мм из стали типа сталь 20. При изгибе плоской стальной пластины поверхность металла претерпевает значительную пластическую деформацию, величина которой зависит от толщины пластины,

угла и радиуса загиба, а также механических свойств стали деформируемой пластины.

Образцы гнули через специальную оправку, затем выпрямляли до плоского исходного состояния. Пластическую деформацию $\varepsilon_{пл}$ в приповерхностных слоях образца определяли по формуле

$$\varepsilon_{пл} = \frac{y}{r} - \frac{\sigma_{-1}}{E}, \quad (1)$$

где y – расстояние от внешних волокон до нейтрального слоя, мм;

r – радиус скругления образца, мм;

σ_{-1} – предел усталости, МПа;

E – модуль упругости, МПа.

После деформации при первых пяти перегибах, а далее через каждые 5 последующих перегибов снимали показания изменения времени распространения акустических волн. В ходе проведения эксперимента получена зависимость изменения времени распространения акустической волны от механических свойств металла в условиях деформирования плоского образца при повторно-статической нагрузке, представленная на рисунке 2. Зависимость представляет собой полиномиальную функцию $(\Delta t/t_{имп}^0) = a + b \cdot n + c \cdot n^2 + d \cdot n^3$, где коэффициенты: $a = 0,022$; $b = 0,354$; $c = -0,043$; $d = 0,002$.

Необходимо отметить изменение поведения материала образца на различных интервалах (I, II, III) (рисунок 2) малоциклового нагружения.

На начальной стадии повреждения при первых циклах (интервал I графика) на поверхности испытываемого образца происходит зарождение усталостных полос скольжения, с последующим равномерным движением дислокаций на поверхности и внутри металла, которое характеризует более пологий интервал II графика. Далее образуются и увеличиваются микротрещины, которые характеризуют скачок в месте перегиба графика (граница интервалов II и III графика). Образование микротрещин выявлено в ходе проведения капиллярного контроля при проведении эксперимента. Интервал III графика характеризует слияние микротрещин в одну более

крупную магистральную трещину, приводящую к разрушению образца.

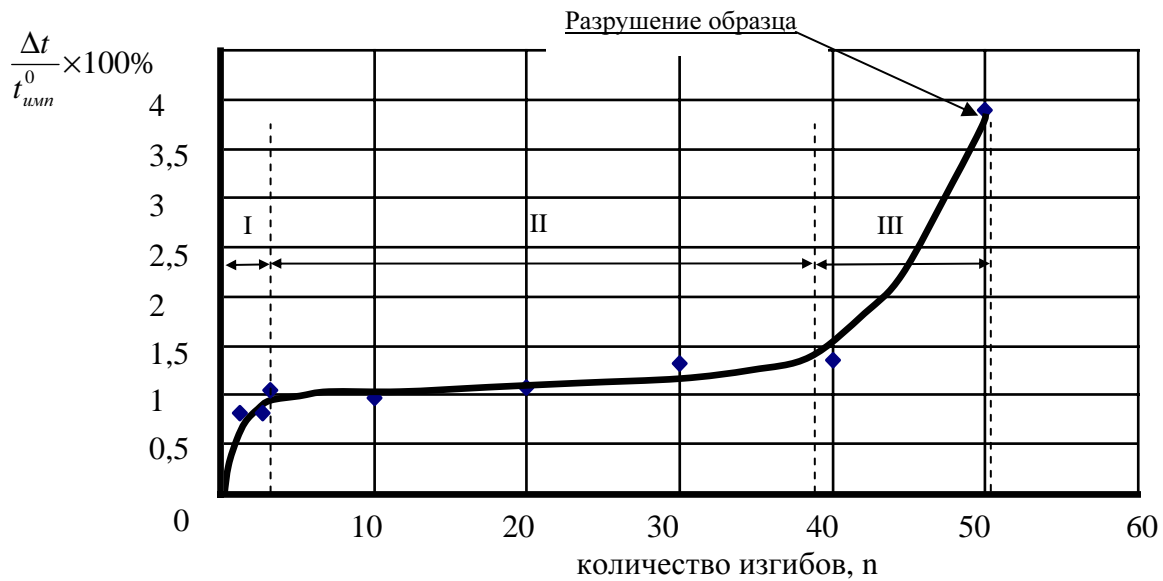


Рисунок 2 – Зависимость времени распространения акустических волн от количества изгибов образца

При двадцатом цикле малоциклового нагружения поврежденность металла на поверхности образцов достигает порядка 100 %, что находится на уровне 1,25 % изменения времени распространения акустических волн при испытаниях на растяжение плоских образцов. Это свидетельствует о сопоставимости результатов экспериментов статического и циклического нагружения образцов. Интервал III графика при малоцикловых испытаниях плоских образцов на изгиб стал доступен в связи с тем, что после образования микротрещин в интервале II графика, происходило равномерное развитие магистральной трещины, путем слияния микротрещин. При испытаниях на растяжение этот процесс происходил мгновенно из-за локализации деформаций в шейке образца.

В связи с тем, что критерием безопасной эксплуатации нефтегазового оборудования является отсутствие микротрещин и несплошностей в металле, ограничивающий предел уровня снижения времени распространения акустических волн при пластической деформации для сталей составит – 1,25 %.

По результатам исследований разработана методика измерения величины пластических деформаций при сложном напряженно-деформированном

состоянии металла газопроводов акустическими волнами, с последующим определением остаточного ресурса безопасной эксплуатации дефектных участков газопроводов. Методика апробирована и нашла применение на практике, в частности при диагностировании напряженно-деформированного состояния металла газового оборудования и газопроводов.

В третьей главе рассмотрены причины образования дефектов формы труб и проведен анализ циклического режима эксплуатации газопроводов УЭСП ООО «Оренбурггазпром», на основе которого разработана методика проведения гидравлических испытаний и испытательное оборудование.

Вероятность образования вмятин на различных трубах (таблица 1) оценивали по величине критической нагрузки

$$F_{кр} = \frac{\sigma_T \cdot t^2}{0,42 \cdot \ln \frac{0,215(D_H - t)}{2R} + \frac{3}{2\pi}}, \quad (2)$$

где σ_T - предел текучести металла трубы, МПа;

t и D_H – толщина стенки и диаметр трубы, мм;

R – радиус поверхности, по которой распределена радиальная нагрузка.

Таблица 1 – Трубы, рассчитанные на образование вмятин по величине критической нагрузки

№ трубы	Фирма	D, мм	t, мм	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	$F_{кр}$, кН		D/t
							R, 100 мм	R, 50 мм	
1	GTS	530	6,0	461	586	23,1	70,1	31,4	88,3
2	Кавасаки	530	8,8	513	626	20,0	169,5	75,6	60,2
3	Кавасаки	530	12,0	501	614	22,0	311,2	137,9	44,2
4	Кавасаки	720	11,3	577	665	22,0	202,7	112,5	63,7
5	Кавасаки	720	6,2	559	630	21,0	58,6	32,7	116,1
6	Ниппон стил	530	7,1	495	622	22,5	105,8	47,4	74,6
7	Ниппон стил	530	12,0	474	584	24,0	294,4	130,5	44,2
8	Ниппон стил	530	14,0	456	566	21,0	388,2	171,4	37,9
9	Ниппон стил	720	10,8	493	627	21,5	158,1	87,8	66,7
10	Сумитомо	720	7,6	544	647	23,5	85,9	47,8	94,7
11	ЧТЗ	530	8,0	410	550	23,0	111,6	49,9	66,3
12	ЧТЗ	720	10,0	410	550	23,0	112,6	62,6	72,0

По результатам расчета выяснили, что наиболее подвержены к образованию вмятин высокопрочные трубы, имеющие наименьшую толщину стенки. Следовательно, рекомендуется использовать трубы на переходах и в скалистых грунтах с соотношением диаметра к толщине стенки не более 50.

В результате анализа режимов нагружений газопроводов выяснили, что они подвергаются в среднем 21 эквивалентному циклу нагружения в диапазоне от $0,1 P_p$ до P_p в год (P_p – рабочее давление в газопроводе). Таким образом, газопроводы за тридцатилетний период эксплуатации подвергаются в среднем 600 эквивалентным циклам нагружений при давлениях от $0,1 P_p$ до P_p .

Методика проведения гидравлических испытаний, необходимая для учета циклически изменяемого давления в газопроводах, включает в себя режимы нагружения давлением дефектных труб с общим количеством эквивалентных циклов нагружений не менее 600, при давлениях от $0,1 P_H$ до P_H (P_H – нормативное рабочее давление, определяется по СНиП 2.05.06-85).

Для создания циклических нагрузок, с целью имитации режимов нагружения действующих газопроводов, разработан гидравлический стенд.

Из гидробака Б, оборудованного датчиком уровня жидкости, рабочая жидкость (вода) поступает на насос Н1 через расходомер и фильтр Ф1 (рисунок 3). Для получения циклических нагрузок в схеме предусмотрено применение обратного клапана КО, с помощью которого открывают или закрывают поток рабочей жидкости на слив в гидробак Б. Управление гидроклапаном осуществляется с помощью электроконтактного манометра МН2. При достижении максимального давления в системе, установленного оператором на электроконтактном манометре, подается электрический ток на магнитную катушку клапана КО. Магнит притягивает золотник клапана, тем самым открывает поток рабочей жидкости на слив. Когда давление в системе достигнет минимального значения, через электроконтактный манометр отключается ток, питающий магнитную катушку клапана и перекрывается поток рабочей жидкости, идущей на слив. Давление в системе повторно растет до максимального значения и т.д., цикл повторяется.

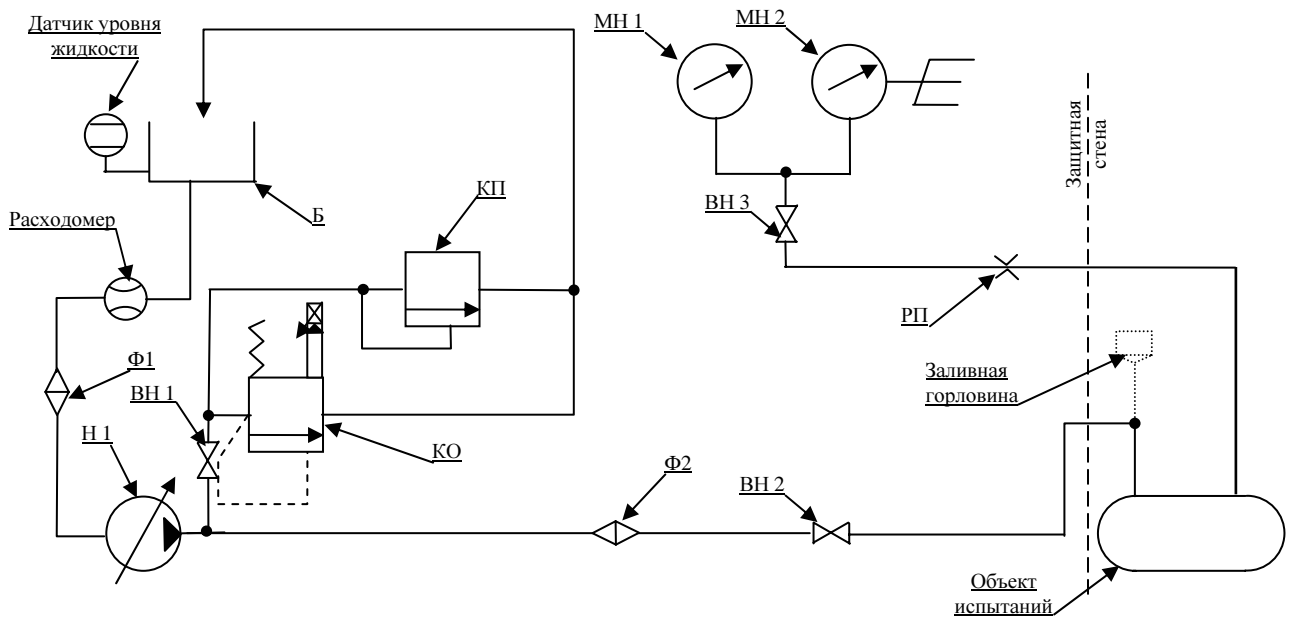


Рисунок 3 – Принципиальная схема гидравлического стенда

Объектом гидравлических испытаний являлись дефектные натурные образцы труб Ду 700 мм, вырезанные из газопровода «Оренбург-Салават-Уфа». Характеристики исследуемых образцов труб приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Характеристики исследуемых образцов труб Ду 700 мм из стали API 5LX X70

Номер образца трубы	Дефект	Глубина дефекта h, мм	Отношение длины к ширине дефекта (L/B), мм	Толщина стенки трубы t, мм
1	Вмятина	20	260/520	6,2
2	Гофр	68	1360/320	7,6
3	Вмятина на кольцевом шве	34	350/270	7,6
4	Вмятина на продольном шве	32	500/450	7,6
5	Вмятина	17	180/260	7,6
6	Гофр	31	800/310	6,2
7	Гофр	47	880/410	7,8

Одна из испытуемых труб, содержащая гофр глубиной 68 мм, с минимальным радиусом кривизны на наружной поверхности (выпуклой части гофра - 11,5 мм, вогнутой части гофра – 11 мм) и толщиной стенки 7,6 мм показана на рисунке 4.

Результаты проведенных гидравлических испытаний показали, что вмятины в любой области трубы, как в области основного металла, так и в

области сварных соединений, выдерживают малоцикловые и статические нагрузки. Металл труб в области дефектов формы подвергается деформациям в упругопластической области, т.е. малоциклового усталости.

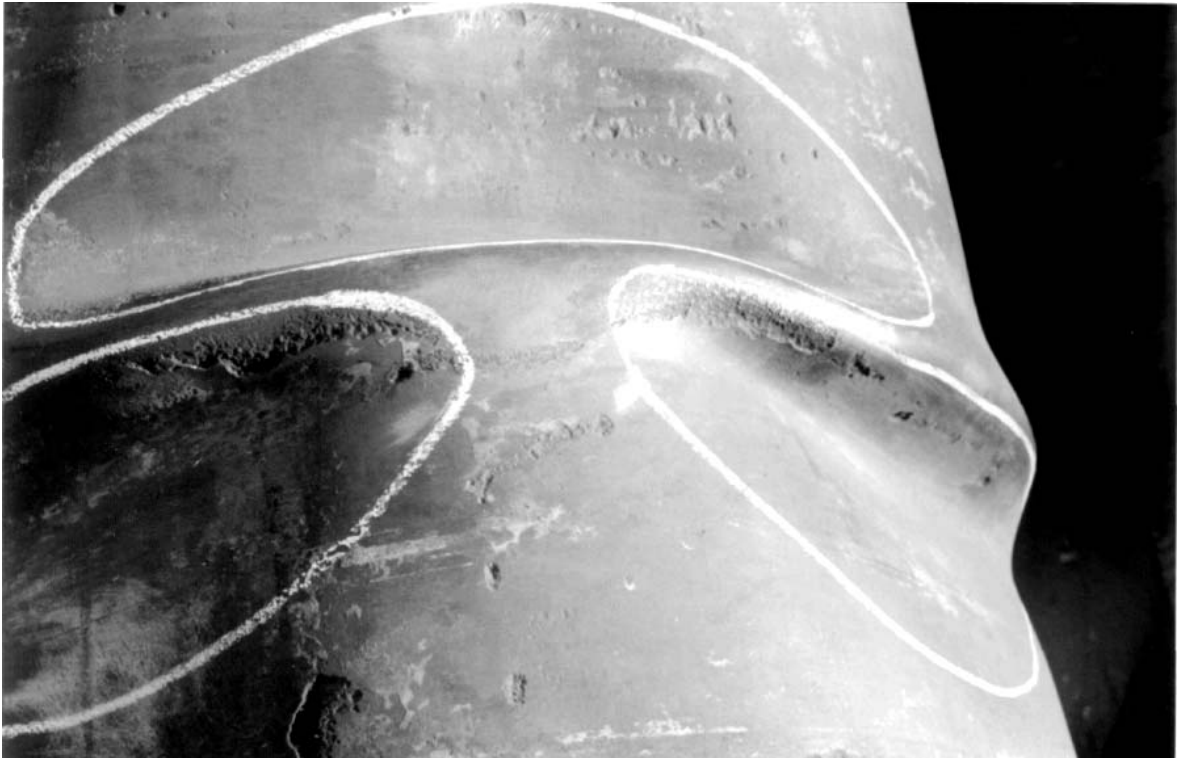


Рисунок 4 – Гофр

Вмятины, расположенные вне области сварных соединений и не имеющие язв, рисок и задигов, в процессе циклического нагружения уменьшаются по глубине, при этом снижается концентрация напряжений в металле зоны вмятин, что приближает срок безопасной эксплуатации участка газопровода с вмятиной к сроку службы газопровода, не содержащего дефекты.

Наибольшую опасность при циклических нагрузках представляют гофры, т.к. они имеют наименьшие радиусы кривизны в зоне деформаций. Поэтому в области гофр при циклических нагрузках происходят деформации металла с большой амплитудой. При возникновении микротрещин на поверхности трубы напряжения от изгиба уменьшаются, вследствие перераспределения напряжений, и процесс развития трещин замедляется. Существенное увеличение размеров трещин наблюдается при увеличении размаха давления.

По результатам проведенных гидравлических испытаний установлено, что газопроводы с дефектами формы стенки труб, сопоставимыми с дефектами испытанных труб, за исключением труб с дефектами типа гофр, имеют прогнозируемый остаточный ресурс работы безопасной эксплуатации 20-25 лет при вышеуказанных режимах нагружения.

В четвертой главе рассматриваются вопросы эффективности контроля и определения остаточного ресурса безопасной эксплуатации металла дефектных участков труб акустическим неразрушающим методом контроля и предложена расчетная методика оценки потенциальной опасности дефектных участков магистральных газопроводов с прогнозированием остаточного ресурса.

Метод АУЗИ был применен при проведении гидравлических испытаний дефектных труб (таблица 2), вырезанных из магистрального газопровода Ду 700 мм «Оренбург-Салават-Уфа» из стали API 5LX X70 согласно вышеописанной методике. В процессе испытаний труб с дефектами типа вмятин и гофр измерения времени распространения акустических волн производили в зонах перегибов и в центре вмятин и гофр. Полученные данные сравнивались с временем распространения акустических волн на основном металле газопровода (эталон).

Металл труб в области дефектов формы работает в условиях двухосного напряженного состояния, поэтому измерения времени распространения акустических волн, производили как в осевом направлении трубы, так и перпендикулярно осевому направлению трубы.

После каждых ста циклов нагружения труб от $0,1 P_H$ до P_H осуществляли повторное измерение времени распространения акустических волн.

Результаты метода АУЗИ согласовываются с реальным напряженно-деформированным состоянием зон вмятин и гофр, полученным при гидравлических испытаниях дефектных труб с помощью тензометрирования (таблица 3). Разность в показаниях связана с тем, что в процессе проведения гидравлических испытаний методом тензометрирования получили величину усталостного повреждения металла трубы при нахождении объекта под

давлением, а методом АУЗИ получили величину усталостного повреждения после окончания очередного этапа испытаний (без давления). Также методом АУЗИ получаем интегрированную оценку усталостного повреждения по длине и толщине стенки исследуемой трубы с дефектом формы, в то время как тензометрированием данная величина определяется непосредственно на поверхности металла.

Таблица 3 – Усталостное повреждение металла образца трубы №1 в зоне вмятины $h = 20$ мм

Размах давлений и количество циклов	Метод	Усталостное повреждение металла трубы в зоне дефекта, %							
		Основной металл трубы вдоль оси	Основной металл-начало вмятины вдоль оси	Начало вмятины - центр вмятины вдоль оси	Центр вмятины вдоль оси	Основной металл трубы \perp оси	Основной металл-начало вмятины \perp оси	Начало вмятины - центр вмятины \perp оси	Центр вмятины \perp оси
от $0,1P_H$ до P_H 500 циклов	Тензометрирование	13,2	45,0	42,0	35,0	65,0	90,0	87,1	90,0
	Метод АУЗИ	0,6	2,2	5,7	2,5	2,6	2,9	3,4	2,2
от $0,1P_H$ до $1,25P_H$ 100 циклов	Тензометрирование	3,5	7,5	7,1	8,5	15,5	23,0	22,7	23,8
	Метод АУЗИ	0,8	3,4	6,8	29,3	3,8	6,0	4,0	2,5
от $0,1P_H$ до $1,5P_H$ 10 циклов	Тензометрирование	0,5	0,7	0,9	1,0	2,0	2,7	2,7	2,6
	Метод АУЗИ	0,8	15,3	45,2	26,0	5,5	17,1	27,8	6,7
от $0,1P_H$ до $1,75P_H$ 10 циклов	Тензометрирование	0,6	0,1	0,1	1,1	2,2	2,8	2,6	2,6
	Метод АУЗИ	36,2	23,9	41,3	11,0	45,1	30,9	36,3	6,9
Итого	Тензометрирование	17,7	53,3	50,1	45,6	84,7	118,6	115,1	119,0
	Метод АУЗИ	36,2	23,9	45,2	29,3	45,1	30,9	36,3	6,9

На основе результатов экспериментальных исследований метода АУЗИ и гидравлических испытаний дефектных труб предложена расчетная методика определения остаточного ресурса газопроводов с дефектами формы труб.

Первым этапом предлагаемой расчетной методики определения остаточного ресурса безопасной эксплуатации газопроводов с дефектами формы труб является визуально-измерительный контроль дефекта, при котором определяются геометрические размеры дефекта.

При определении остаточного срока службы дефектной трубы по предлагаемой методике необходимы следующие исходные данные: толщина стенки трубы t , мм; наименьший радиус кривизны в дефекте r , мм; величина относительного сужения поперечного сечения при разрыве ψ ; анализ количества циклов нагружения труб и расчет эквивалентного количества циклов нагружения.

Далее по модифицированной формуле Коффина-Менсона рассчитывают количество циклов нагружения давлением труб до момента образования трещин:

$$N = \left\{ \left[\frac{1}{2} \cdot \left(\ln \frac{1}{1-\psi} - \varepsilon_{nl} \right) \right] / (\varepsilon_{ц} \cdot \alpha) \right\}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{пл}$ – величина исходной деформации при изгибе стенки трубы;

$\varepsilon_{ц}$ – величина деформации за один цикл нагружения;

n – коэффициент запаса долговечности;

α – коэффициент концентрации напряжений в дополнительном дефекте в области вмятины (гофра).

Полученное значение N делят на эквивалентное количество циклов за один год и получают прогнозируемый остаточный ресурс работы участка газопровода с дефектом формы в годах.

В формуле (3) неизвестны величина исходной деформации при изгибе стенки трубы $\varepsilon_{пл}$ и величина деформации за один цикл нагружения $\varepsilon_{ц}$. Исходная деформация при изгибе стенки трубы $\varepsilon_{пл}$ определяется по формуле (1), но в этом случае не учитывается усталостная составляющая поврежденности металла в области дефекта формы трубы, т.к. газопровод с данным дефектом мог проработать неопределенное время при циклическом изменении давления. Более точно $\varepsilon_{пл}$ можно определить с помощью метода АУЗИ. Величины максимальной деформации за один цикл нагружения $\varepsilon_{ц}$ установлены экспериментально по результатам тензометрирования труб с дефектами формы в процессе гидроиспытаний (рисунки 5, 6). Регрессионный анализ экспериментальных данных, проведенный при помощи статистического пакета Stadia 6.2, позволил получить графики возможных максимальных величин деформаций при доверительной вероятности $P = 0,95$.

С учетом результатов проведенного анализа геометрических параметров наиболее распространенных вмятин, график на рисунке 5 условно разделен на четыре интервала. Интервал IV относится к вмятинам с глубиной менее $0,01 D$ трубы.

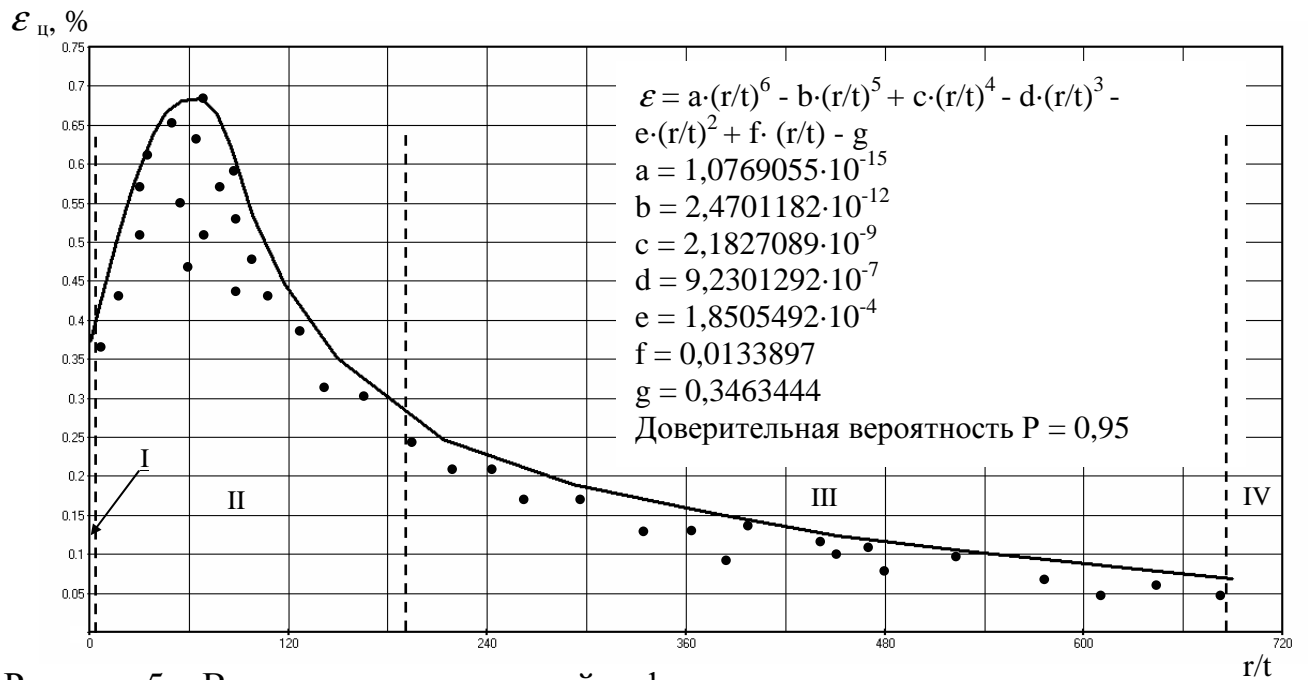


Рисунок 5 – Величина максимальной деформации во вмятинах при размахе давления в трубе 6,5 МПа

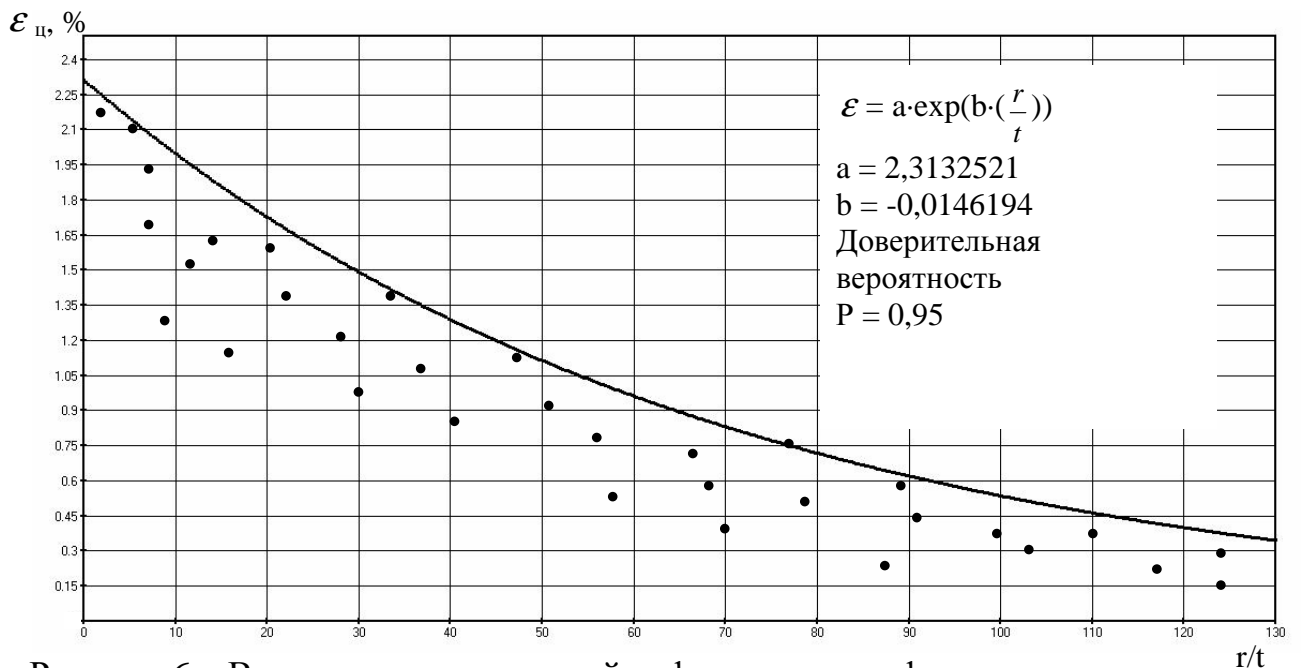


Рисунок 6 – Величина максимальной деформации в гофрах при размахе давления в трубе 6,5 МПа

Этот интервал графика не представляет интереса с точки зрения опасности дефектов. Интервал III включает вмятины с глубиной менее $0,035 D$, поэтому также считаем их неопасными, т.к. по СНиП 2.05.06-85* такие вмятины допускается выправлять, и результаты проведенных исследований показывают,

что по данным вмятинам не происходит разрушений. Наибольший интерес представляет интервал II, в который попадают наиболее распространенные вмятины, относящиеся к опасным. В интервал I попадают несуществующие вмятины по величине радиуса кривизны стенки трубы r , поэтому он не рассматривается. Для гофр величины максимальной деформации изменяются по экспоненциальной зависимости в зависимости от геометрических параметров дефекта (рисунок б).

Согласно разработанной методике рассчитан остаточный ресурс труб с дефектами типа вмятин и гофр, подвергнутых гидравлическим испытаниям. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Сопоставление расчета остаточного ресурса труб с дефектами формы с результатами гидроиспытаний

Номер образца трубы	Глубина дефекта h , мм	Отношение длины к ширине дефекта (L/B), мм	Толщина стенки трубы t , мм	Отношение радиуса кривизны поверхности к толщине стенки r/t , мм	Прогнозируемый остаточный ресурс, лет		К
					21 цикл в год		
					по результатам гидроиспытаний	по расчету	
1	20	260/520	6,2	69,8	44	28,26	1,56
2	68	1360/320	7,6	1,4	1,5	0,44	3,41
3	34	350/270	7,6	37,5	28,5	13,69	2,08
4	32	500/450	7,6	106,2	25	23,23	1,08
5	17	180/260	7,6	32,5	44	36,11	1,22
6	31	800/310	6,2	4,8	2,1	0,63	3,33
7	47	880/410	7,8	4,4	2,6	0,67	3,88

Из таблицы 4 следует, что коэффициент запаса расчетной методики определения остаточного ресурса относительно результатов экспериментальных исследований К согласно расчету зависит от вида дефекта и его геометрических размеров. С уменьшением радиуса кривизны поверхности уменьшается остаточный ресурс труб с вмятинами и гофрами.

В результате расчета дефектных участков газопроводов с вмятинами по разработанной методике установлено, что средний коэффициент запаса по времени эксплуатации относительно требований действующих НТД равен 1,49, для участков газопровода с гофрами – 3,54, т.е. чем опаснее дефект, тем

большой запас по расчету остаточного ресурса безопасной эксплуатации дефектного участка газопровода предусматривает предлагаемая методика.

Разработанная методика позволяет точно и с определенным запасом установить остаточный срок эксплуатации газопроводов с дефектами формы труб, т.к. учитываются наиболее значимые геометрические параметры дефектов и режимы нагружения газопроводов.

Согласно результатам по предлагаемой методике более 70 % дефектов формы труб магистрального газопровода Ду 700 мм «Оренбург-Салават-Уфа», считающихся опасными и потенциально-опасными по НТД, годны к эксплуатации, по меньшей мере, еще на протяжении 10-15 лет.

Стоимость традиционного ремонта методом вырезки трубы Ду700 мм одного участка длиной 1 метр по данным ОКС УЭСП ООО «Оренбурггазпром» равна 7109 р. и замены участка газопровода Ду700 мм - 17476 р. По результатам экономического расчета установлено, что обоснованное продление срока эксплуатации одного участка магистрального газопровода Ду 700 мм «Оренбург-Салават-Уфа» с дефектом формы даст экономию не менее 25 000 рублей.

Таким образом, на основе известных методов, результатов собственных экспериментальных исследований и гидравлических испытаний создана методика определения остаточного ресурса газопроводов с дефектами формы труб.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Предложена апробированная в газовой отрасли методика определения усталостного повреждения металла в области дефектов формы труб по изменению времени распространения акустических волн.

2 На основе анализа режимов работы газопроводов и расчета эквивалентного количества циклов нагружений установлено, что газопроводы за период эксплуатации ~30 лет подвергаются в среднем 600 эквивалентным циклам нагружений при давлениях от 0,1 до 1,0 рабочего давления, т.е. трубы испытывают малоцикловое нагружение.

3 Определены причины образования дефектов формы труб и рекомендовано при строительстве газопроводов применять на пересеченной местности трубы с соотношением диаметра к толщине стенки не более 50, что позволит повысить безопасность эксплуатации газопроводов.

4 Создан стенд и разработана методика циклических испытаний труб, учитывающая эксплуатационные режимы нагружения газопроводов. Установлено, что при равных геометрических параметрах дефектов формы труб ресурс циклического нагружения труб с гофрами в 2,4 раза меньше, чем труб с вмятинами.

5 Разработана расчетная методика оценки потенциальной опасности дефектных участков газопроводов с вмятинами и гофрами, позволяющая определить с заданным коэффициентом запаса по долговечности остаточный ресурс участков газопроводов с дефектами формы труб, обосновать сроки проведения ремонта и повысить безопасность эксплуатации газопроводов.

6 Продление срока эксплуатации одного участка газопровода Ду 700 мм «Оренбург-Салават-Уфа» с дефектом формы трубы, по результатам предложенной методики, дает экономию порядка 25 000 рублей.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1 Агишев В.Н., Самигулов И.Н. Влияние шероховатости поверхности изделия на скорость распространения акустических поверхностных волн// Актуальные проблемы подготовки кадров для развития экономики Оренбуржья: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. - Оренбург: ИПК ОГУ, 2002. – с. 205-206.

2 Агишев В.Н., Самигулов И.Н. Оценка повреждаемости стали ультразвуковыми методами контроля// Актуальные проблемы подготовки кадров для развития экономики Оренбуржья: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. - Оренбург: ИПК ОГУ, 2002. – с. 206-207.

3 Агишев В.Н., Чирков Ю. А., Кушнарченко В. М., Самигулов И.Н. Оценка физико-механических свойств сталей акустическими поверхностными волнами// Вестник ОГУ. – 2002. – №5. – с.145-148.

4 Самигулов И.Н., Агишев В.Н. Применение метода автоциркуляций ультразвуковых импульсов к диагностированию газопроводов// Прочность и разрушение материалов и конструкций: Материалы III Всероссийской научно-технической конференции (23-25 июня 2002 года). – Орск: Изд-во ОГТИ, 2002. – с.81-82.

5 Самигулов И.Н., Агишев В.Н. Оценка повреждаемости стали с помощью акустических поверхностных волн// Региональная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов Оренбургской области: Сборник материалов. – Оренбург: ИПК ОГУ. – 2002. – 1 с. 4-16.

6 Чирков Ю.А., Швец А.В., Ахметов В.Н., Щепинов Д.Н., Кушнарченко В.М., Агишев В.Н. Техническое состояние конденсатопровода «Оренбург-Салават-Уфа» (IV нитка)// Диагностика оборудования и газопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред: Материалы IV Международная научно-техническая конференции. – Оренбург, 2002. – с. 112-119.

7 Агишев В.Н., Гафаров Н.А., Швец А.В., Овчинников П.А., Кушнарченко

В.М., Чирков Ю.А. Оценка нагруженности и прочности дефектных участков конденсатопровода «Оренбург-Салават-Уфа»// Диагностика оборудования и газопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред: Материалы IV Международная научно-техническая конференции. – Оренбург, 2002. – с. 120-126.

8 Чирков Ю.А., Агишев В.Н. Динамика изменения глубины вмятин от величины давления и количества циклов нагружения.// Прогрессивные технологии в транспортных системах: Сборник докладов в VI Всероссийской научно-технической конференции. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. – с. 245-246.

9 Агишев В.Н. Определение срока безопасной эксплуатации трубопроводов с дефектами формы// Прочность и разрушение материалов и конструкций: Материалы Международной научной конференции – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. – с. 79-80.