На правах рукописи

УДК 621.791:620.111.3

Щипаков Никита Андреевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И АППАРАТУРЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ ТРУБОПРОВОДОВ

05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель: **АЛЁШИН Николай Павлович,** доктор технических наук, академик РАН

Официальные оппоненты: **КОНОНОВ Владимир Васильевич,** доктор технических наук, профессор, НПЦ «Молния», генеральный директор

ЛЮТОВ Михаил Аркадьевич, кандидат технических наук, НИИ КС ГКНПЦ им. М.В.Хруничева, главный инженер

Ведущая организация: **ФГУП «НИИ мостов и дефектоскопии Федерального агентства железнодорожного транспорта»** (г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится « 18 » октября 2012г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ваш отзыв на автореферат диссертации в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Телефон для справок (499) 267-09-63

Автореферат разослан «11» сентября 201

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
2000608
Щипаков Н.А.Разработка мет

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.01,
доктор технических наук, доцент А.В. Коновалов

Акт УИК

Актуальность работы. В настоящее время в России эксплуатируется свыше 233 тыс. км магистральных трубопроводов, в том числе свыше 168 тыс. км газопроводов, 49 тыс. км нефтепроводов и 16 тыс. км нефтепродуктопроводов. Средний возраст газопроводов составляет 22 года, старше 20 лет - 37%, старше 30 лет - 40%. К 2015 году протяженность газопроводов со сроком эксплуатации более 30 лет составит около 100 тыс. км. Срок службы почти половины магистральных нефтепроводов близок к амортизационному сроку эксплуатации: свыше 33 лет - 30%, от 20 до 30 лет - 37%, т.е. протяженные участки магистральных трубопроводов исчерпали свой нормативный ресурс или близки к этому. Поэтому значительная часть системы магистральных трубопроводов нуждается в диагностических обследованиях и оценке надежности и остаточного ресурса.

Для достоверной оценки надежности и остаточного ресурса помимо информации о форме и размерах дефектов, механических характеристиках материала, необходимо знать реальные значения механических напряжений в элементах конструкции. Данные теоретических расчетов напряженно-деформированного состояния могут быть не точны, т.к. НДС конструкции может меняться в процессе монтажа и эксплуатации.

Задача определения механических напряжений для оценки остаточного ресурса обусловила разработку многочисленных методов – механических, оптических, электрических, магнитных, рентгеновских и других. При наличии определенных достоинств каждый из перечисленных методов обладает и рядом недостатков.

Анализ литературы за последние два-три десятилетия показывает, что среди неразрушающих физических методов контроля состояния материала одним из наиболее перспективных следует признать акустический метод. К преимуществам акустических методов относятся сравнительная дешевизна аппаратных средств, относительная простота реализации, оперативность контроля, физическая наглядность, портативность, безвредность для обслуживающего персонала, гибкость применения на различных стадиях производства, хранения, эксплуатации и ремонта изделий и технических объектов различного назначения. Также при помощи акустического метода возможно измерять как поверхностные значения напряжений, так и интегральные по толщине.

Основные достижения в области определения напряжений при одноосном НДС методом акустоупругости отражены в монографиях и статьях Бобренко В.М. и Куценко А.Н. Теоретические и экспериментальные проблемы исследования плоского напряженного состояния твердых тел рассмотрены в книгах Гузя А.Н., Махорта Ф.Г. и Гущи О.И. Большой вклад в изучение акустоупругого эффекта в твердых телах внесли Бенсон Р.В. иРилсонВ.Дж., Буденков Г.А., Токуока Т., Трусделл К., Фукуока Х., Хирао М., Никитина Н.Е., Углов А.Л., Алешин Н.П., Прилуцкий М.А., Шнайдер Э. и др.

МГТУ им. Н.Э. Баумана Библиотека

Однако на практике этот метод до сих пор не получил широкого распространения за счет низкой достоверности определения

механических напряжений. Низкая достоверность, по-видимому, объясняется некорректным измерением относительных акустических параметров упругих волн в объекте контроля из-за наличия слоя контактной жидкости, необходимой при использовании контактных пьезоэлектрических преобразователей.

Целью работы являлось повышение достоверности определения механических напряжений в основном металле магистральных трубопроводов акустическим методом.

Задачи исследования:

1. Выявить наиболее чувствительные типы волн для задач измерения напряжений в основном металле линейной части магистрального трубопровода.

2. Установить зависимости акустических параметров головных волн от действующих механических напряжений.

3. Разработать и создать оборудование для бесконтактного определения напряжений.

4. Провести экспериментальную проверку созданного оборудования с использованием разработанных алгоритмов.

5. Разработать методику определения механических напряжений линейной части магистральных трубопроводов.

Научная новизна

1. Установлено, что в случае определения напряжений с поверхности контролируемого объекта, параллельной плоскости действия напряжений, наиболее чувствительной является головная волна, распространяющаяся вдоль действия нагрузки.

2. Показано, что в случае одноосного НДС более достоверные результаты определения значений поверхностных напряжений с применением головных волн получены при использовании акустического параметра, который представляет собой относительную разницу времен распространения головной волны вдоль действия нагрузки и без нагрузки.

3. Получены зависимости для определения поверхностных значений механических напряжений в случае двухосного НДС через 4 акустоупругих коэффициента и 2 акустических параметра, представляющих собой относительные разницы времен распространения головных волн вдоль действия нагрузки и без нагрузки, распространяющихся в перпендикулярных направлениях относительно друг друга.

Практическая ценность

Разработана методика определения напряжений в точке с применением в комплексе объемных волн для определения интегрального по толщине значения напряжений стенки трубопровода, а также головных волн для определения значений поверхностных напряжений.

Методы исследования

Методы исследования, использованные в настоящей работе, включали разделы акустики, теоретической физики, математического анализа. Решение задач выполнено с применением ЭВМ. Экспериментальные исследования

проведены на современном отечественном оборудовании, а также на специально созданных образцах.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на научных семинарах кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э.Баумана в 2011 и 2012 годах, на третьей и четвертой Всероссийских конференциях молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» в 2010 и 2011 годах.

Публикации

Материалы диссертации отражены в 4 печатных работах, из них 2 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, и 1 патенте.

Объем работы

Диссертационная работа изложена на 101 странице машинописного текста, иллюстрируется 35 рисунками, содержит 13 таблиц, состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы (66 наименований).

Автор выражает благодарность М.А. Прилуцкому за помощь при постановке и проведении экспериментов по данной работе.

Содержание работы

В первой главе рассмотрены конструктивные особенности магистральных трубопроводов, материал, технология их изготовления и виды эксплуатационных нагрузок, действующих на трубопроводы.

Анализ существующих методов определения напряженного состояния показал, что для таких объектов контроля, как линейная часть магистральных трубопроводов, наиболее подходящим и перспективным является акустический метод, основанный на явлении акустоупругости, т.е. зависимости скорости распространения упругих волн в материале от действующих напряжений.

Исследованию возможностей применения акустического метода посвящены работы как российских, так и иностранных специалистов и ученых.

Явление акустоупругости впервые экспериментально наблюдалось в 1959 году Бенсоном и Рилсоном.

В работах Бобренко В.М. и Куценко А.Н. приведены основные достижения в области определения напряжений при одноосном НДС методом акустоупругости.

Труды А.Н. Гузя, Ф.Г. Махорта, О.И. Гущи посвящены теории распространения упругих волн малой амплитуды в сжимаемых телах с начальными напряжениями.

Методы применения акустоупругого эффекта на практике приведены в работах Н.Е. Никитиной, А.Л. Углова, В.М. Бобренко и других.

Публикации иностранных специалистов посвящены определению напряжений при плоском напряженном состоянии при помощи алгоритмов, в

которых участвуют величины относительных изменений скоростей сдвиговых волн и константы второго и третьего порядка.

Однако, до сих пор не решена проблема экспресс-метода диагностики напряженно-деформированного состояния магистрального трубопровода. На практике на реальных объектах метод акустической тензометрии так и не получил широкого распространения.

Одной из главных проблем акустической тензометрии основного металла опасных производственных объектов является малая повторяемость результатов измерений. Это происходит из-за наличия контактной жидкости при использовании пьезоэлектрических преобразователей для возбуждения и приема ультразвука.

В работе предложено для определения интегральной по толщине величины напряжений применять бесконтактные электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи.

Ещё одним фактором, препятствующим применению метода акустической тензометрии на практике, является несовершенство методики измерения напряжений. На изменение характеристик распространения упругих волн влияет не только сопровождаемое напряжениями изменение межатомных расстояний и упругих модулей, т.е. в конечном счёте – деформация, но и иные физические поля (температурное, электромагнитное), структурная анизотропия материала, его предыстория, геометрия объекта и состояние ограничивающих поверхностей, наличие зон пластической деформации и т.д. Поэтому не всегда достаточно судить о величине напряжений лишь по одному параметру. Необходима методика, основанная на измерении акустических параметров различных типов волн.

В данном работе предложена методика определения напряжений с использованием в комплексе головной волны для определения поверхностных значений напряжений, а также объемных волн для определения интегральной по толщине величины напряжений.

Для решения задачи определения механических напряжений в линейной части магистрального трубопровода необходимо создать алгоритм, оборудование и методику определения напряжений с использованием акустических параметров различных типов волн.

Во второй главе рассмотрены теоретические основы акустоупругости, проанализирована чувствительность различных типов волн к действующим механическим напряжениям, приведены алгоритмы расчета для определения поверхностных и интегральных по толщине величин напряжений при одноосном и двухосном напряженно-деформированном состоянии.

Наиболее чувствительной к напряжениям является упругая волна, распространяющаяся вдоль действия нагрузки, направление смещения частиц которой также совпадает с направлением действия нагрузки, т.е. продольная волна, распространяющаяся вдоль действия напряжений. Однако, в объектах контроля, таких как трубопроводы или тонкостенные детали мостовых конструкций, где преимущественно преобладает плоское напряженное состояние, ввод ультразвука возможен только с поверхности,

параллельной плоскости действия напряжений. Волной, которую возможно возбудить с поверхности, параллельной плоскости действия напряжений таким образом, чтобы направление ее распространения совпадало с направлением действия напряжений, а также направление смещения частиц которой совпадало с направлением действия напряжений, является головная волна. В работах М.А.Прилуцкого показана возможность использования головных волн для определения механических напряжений.

В данной работе нами экспериментально подтверждено, что чувствительность головной волны к действующим механическим напряжениям близка к чувствительности продольной волны, распространяющейся вдоль действия нагрузки (V_{11}'на рисунке 2).

Т.е. для задачи определения напряжений с поверхности параллельной плоскости действия напряжений наиболее предпочтительной является головная волна. Однако, поскольку головная волна является подповерхностной волной и распространяется вдоль поверхности образца, то, соответственно, возможно определение только поверхностных значений напряжений.

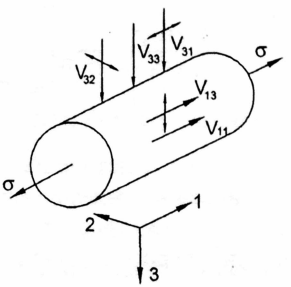


Рис. 1. Схема эксперимента

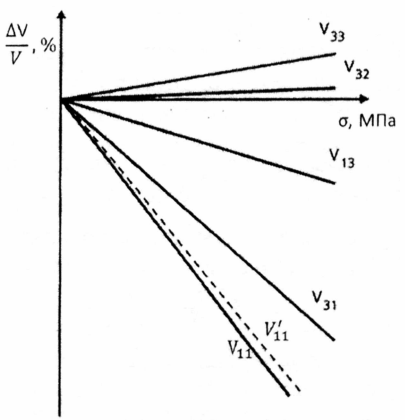


Рис. 2. Относительное изменение скорости распространения упругих волн под действием напряжений

Зависимость скорости распространения ультразвука от действующих напряжений выражена основным уравнением акустоупругости:

$$V^i = V_0^i * (1 + k\sigma) \tag{1.1}$$

Где V_0^i – скорость ультразвуковой волны до действия нагрузки,

V_i – скорость ультразвуковой волны в момент действия нагрузки,

σ – значение действующих напряжений,

k – коэффициент акустоупругости.

Но скорость ультразвука не является непосредственно измеряемой величиной, т.к. измерять возможно только временную задержку между моментом излучения и прихода волны.

Решение основного уравнения акустоупругости для определения значения поверхностных напряжений при одноосном НДС при помощи головной волны представлено в виде:

$$\sigma = K * \frac{\Delta t_{r1}}{t_{r1}^0} \tag{1.2}$$

где К – упругоакустический коэффициент, который определяется в ходе предварительных тарировочных экспериментов на одноосное растяжение плоского образца:

$$K = \frac{\partial}{\partial \sigma_1}\left(\frac{\Delta t_{r1}}{t_{r1}^0}\right) = \frac{1}{t_{r1}^0}\frac{\partial t_{r1}}{\partial \sigma_1} \tag{1.3}$$

$\frac{\Delta t_{r1}}{t_{r1}^0}$ - относительная разница времени распространения головной волны в материале без напряжений и вдоль действия нагрузки.

В случае двухосного напряженно-деформированного состояния нами предложено измерять временные задержки двух головных волн, распространяющихся перпендикулярно друг другу.

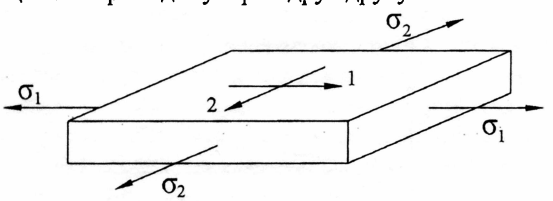


Рис. 3. Направления распространения головных волн при измерении напряжений в случае двухосного НДС

Уравнения для определения значений поверхностных напряжений в случае двухосного НДС представлены в виде:

$$\sigma_1 = A\frac{t_1 - t_1^0}{t_1^0} - B\frac{t_2 - t_2^0}{t_2^0}$$
$$\sigma_2 = C\frac{t_2 - t_2^0}{t_2^0} - D\frac{t_1 - t_1^0}{t_1^0}, \tag{1.4}$$

Где A, B, C, D – упругоакустические коэффициенты материала трубопровода:

$$A = \frac{k_4}{k_1 k_4 - k_2 k_3},$$
$$B = \frac{k_2}{k_1 k_4 - k_2 k_3},$$
$$C = \frac{k_3}{k_1 k_4 - k_2 k_3},$$
$$D = \frac{k_3}{k_1 k_4 - k_2 k_3}. \qquad (1.5)$$

Для определения интегрального значения напряжений по толщине стенки применяют объемные волны (продольные и поперечные), распространяющиеся перпендикулярно плоскости действия напряжений.

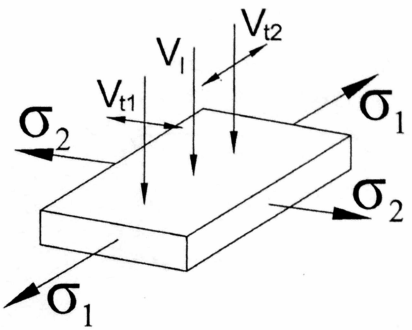


Рис. 4. Схема ввода упругих волн в объект контроля для определения интегральных по толщине значений напряжений

Метод основан на так называемом эффекте двулучепреломления, т.е. явления разложения в анизотропных средах звуковой волны на две составляющие, причем колебания частиц в этих двух волнах взаимно перпендикулярны.

При приложении нагрузки к объекту контроля вдоль одной из осей анизотропии увеличивается степень анизотропии, тем самым возрастает взаимное временное смещение импульсов обоих компонентов сдвиговых волн. Изменение относительной разницы скоростей волн в начальном (ненагруженном) и конечном (нагруженном) состоянии пропорционально действующему напряжению.

В случае одноосного напряженного состояния уравнение акустоупругости имеет вид:

$$\sigma = D(A_0 - A) \qquad (1.6)$$

где A_0 – исходное (нулевое) значение анизотропии,

D – коэффициент упругоакустической связи, определяемый в процессе тарировочных экспериментов,

A – акустический параметр – значение акустической анизотропии, рассчитываемое по формуле:

$$A = \frac{t_2}{t_1} - 1 \qquad (1.7)$$

t_1, t_2 – задержки импульсов упругих поперечных волн, распространяющихся перпендикулярно плоскости действия напряжений, с векторами поляризации, направленными соответственно параллельно и перпендикулярно линии действия напряжения.

Выражения для напряжений σ_1 и σ_2 в случае двухосного напряженного состояния выглядят следующим образом:

$$\sigma_1 = K_1 \frac{d_1 - d_1^0}{d_1^0} - K_2 \frac{d_2 - d_2^0}{d_2^0} \qquad (1.8)$$

$$\sigma_2 = K_3 \frac{d_2 - d_2^0}{d_2^0} - K_4 \frac{d_1 - d_1^0}{d_1^0},$$

где акустические параметры:

$d_1^0 = \frac{t_1^0}{d_2^0}$; $d_2^0 = \frac{t_2^0}{d_2^0}$ - в ненагруженном состоянии

$d_1 = \frac{t_1}{t_2}$; $d_2 = \frac{t_2}{t_2}$ - под действием нагрузки

Коэффициенты упругоакустической связи:

$$K_1 = \frac{k_6 - k_4}{(k_5 - k_1)(k_6 - k_4) - (k_5 - k_3)(k_6 - k_2)},$$

$$K_2 = \frac{k_6 - k_2}{(k_5 - k_1)(k_6 - k_4) - (k_5 - k_3)(k_6 - k_2)}, \qquad (1.9)$$

$$K_3 = \frac{k_5 - k_1}{(k_5 - k_1)(k_6 - k_4) - (k_5 - k_3)(k_6 - k_2)},$$

$$K_4 = \frac{k_5 - k_3}{(k_5 - k_1)(k_6 - k_4) - (k_5 - k_3)(k_6 - k_2)}.$$

В третьей главе описаны программно-аппаратные средства для проведения акустических измерений.

Успешная реализация метода акустической тензометрии в значительной степени определяется уровнем применяемых аппаратно-программных средств. Аппаратная база должна обеспечивать высокоточное измерение временных интервалов между импульсами, распространяющимися в материале исследуемого объекта. Относительная погрешность определения временных параметров не должна превышать значения 10^{-5}. В настоящее время аппаратная база позволяет обеспечивать необходимую производительность и точность измерений.

Для измерения акустических параметров головной волны применялась система «АСТРОН», предназначенная для прецизионного измерения времени распространения (задержек) и отношения размахов ультразвуковых импульсов, распространяющихся в материале исследуемого объекта.

С системой «АСТРОН» использовались преобразователи головных волн, представляющие собой выполненные в одном корпусе излучатель и приемник. Конструкция преобразователя изображена на рисунке 5.

Датчик состоит из призмы 1, выполненной из оргстекла, с углом падения ультразвука 27,5° (для объектов контроля из стали), излучателя 2 и приемника 3 головных волн с центральной частотой 5 МГц и базой преобразователя 14 мм.

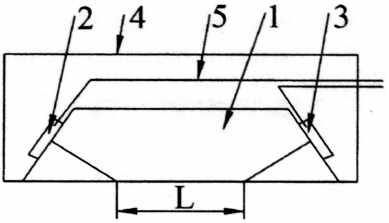


Рис. 5. Преобразователь головных волн:
1 – призма из оргстекла, 2 – излучатель, 3 – приемник, 4 – корпус,
5 – высокочастотный кабель, L – база преобразователя

Для измерения времен распространения объемных волн при бесконтактном возбуждении с участием автора были разработаны прибор АСБАТ и ЭМА-преобразователи.

Внешний вид и структурная схема АСБАТ представлены на рисунке 6.

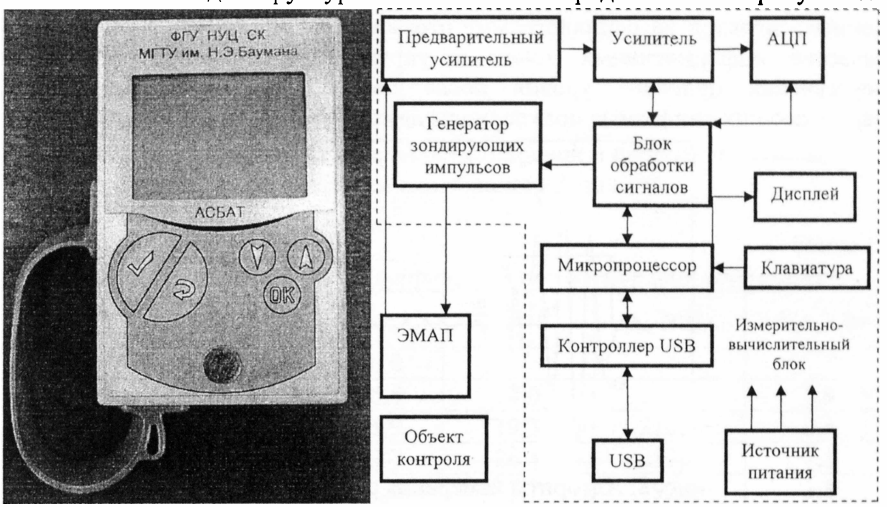


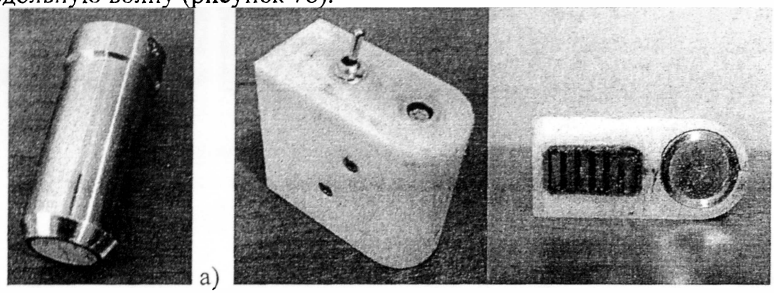
Рис. 6. Внешний вид и структурная схема АСБАТ

Впервые явление электромагнитного возбуждения ультразвука описано в работах В.М. Канторовича, М.И. Каганова и В.Б. Фикса.

Вопросам закономерностей электромагнитного метода приема и излучения различных типов волн посвящены работы С.Н. Шубаева, Ю.М. Шкарлета, Н.Н. Локшиной, Г.А. Буденкова и др.

Использование ЭМА-преобразователей позволяет возбуждать в металле контролируемого объекта разнообразные типы волн (продольные, поперечные). При этом не требуется акустический контакт между преобразователем и контролируемым объектом и обеспечивается хорошая чувствительность. В работе использовались два ЭМА-преобразователя: преобразователь поперечной волны с линейной поляризацией, а также

комплексный ЭМА-преобразователь (рисунок 7а), способный возбуждать две поперечные волны со взаимоперпендикулярными поляризациями и продольную волну (рисунок 7б).



а) б)

Рис. 7. Внешний вид ЭМА-преобразователей

В основу методики измерения времени распространения объемных волн положен алгоритм измерения синфазных точек первого и второго донных сигналов на осциллограмме отраженных импульсов (рисунок 8). В качестве информативных точек в упругом импульсе брались точки пересечения нулевого уровня после первого максимума в стробах, пересекающих синфазные полупериоды двух анализируемых импульсов.

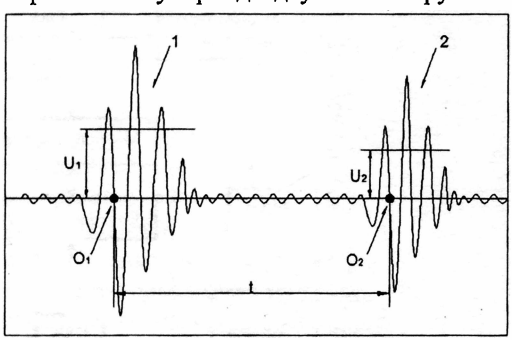


Рис. 8. Алгоритм измерения синфазных точек

<u>В четвертой главе</u> представлены результаты экспериментальной проверки предложенного алгоритма и разработанного оборудования для определения величин напряжений.

Экспериментально подтверждено, что чувствительность к механическим напряжениям головной волны, распространяющейся вдоль действия напряжений, выше чувствительности поперечной волны с линейной поляризацией вдоль действия напряжений. Эксперимент, проведенный на образце из стали 30, показал, что для этой марки стали чувствительность головной волны выше в 2,7 раза (рисунок 9).

$\frac{\Delta t_{r1}}{t^0_{r1}}$ – относительное время распространения головных волн в объекте контроля до и в момент действия нагрузки.

Экспериментально подтверждена возможность определения растягивающих поверхностных напряжений при изгибе плоского образца, предварительно определив упругоакустический коэффициент в ходе тарировочных испытаний на растяжение, например, коэффициент, определенный в ходе тарировочных испытаний на растяжение для стали 30 равен $10{,}9*10^4$МПа.

Результаты эксперимента по определению поверхностных напряжений при изгибе плоского образца представлены в таблице 1.

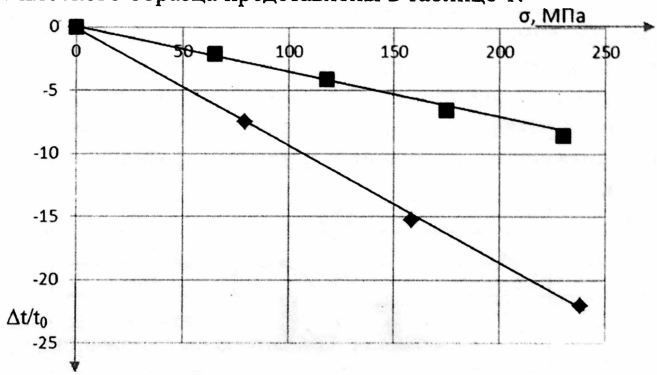


Рис. 9. Сравнение чувствительности головной и поперечной волны к напряжениям для образца из стали 30

Таблица 1.

Определение поверхностных напряжений при изгибе плоского образца

F, кН	$\sigma_р$, МПа	$t_{г1}$, нс	$\frac{\Delta t_{г1}}{t^0_{г1}}*10^4$	$\sigma_и$, МПа	$\Delta(\sigma_т)$, %
0	0	3956,8			
6	156	3960,5	14,0	152,6	0,9
8	208	3961,9	19,3	210,4	0,6
10	260	3963,7	26,4	287,8	7,1
8	208	3961,2	17,7	192,9	3,8
6	156	3959,9	11,9	129,7	6,7

F – величина усилия, прикладываемого к образцу;

$\sigma_р$ – теоретически рассчитанные значения напряжений;

$\sigma_и$ – значения напряжений, определенные в ходе эксперимента;

$\Delta(\sigma_т)$ – погрешность измерения относительно предела текучести.

Из результатов эксперимента видно, что максимальная погрешность относительно предела текучести составила 7,1%. Следовательно, возможно с удовлетворительной точностью измерять значения поверхностных напряжений при изгибе, предварительно определив упругоакустический коэффициент при растяжении плоского образца.

Для проведения эксперимента по определению поверхностных

напряжений при двухосном НДС головными волнами применялся специализированный образец, форма которого выбиралась с целью смоделировать двухосное НДС в точке 1, аналогичное НДС в линейной части магистрального трубопровода. Образец представлен на рисунке 10.

Результаты определения напряжений при помощи головных волн, а также сравнение их с теоретически полученными значениями представлены в таблице 2.

В ходе эксперимента получены результаты, которые показали приемлемую сходимость расчётных и экспериментальных значений напряжений. Максимальная погрешность относительно предела текучести составила для напряжений по оси X 3,8 %, для напряжений по оси Y 7,2 %.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности определения двухосного напряженного состояния в материале трубопровода при помощи головных волн.

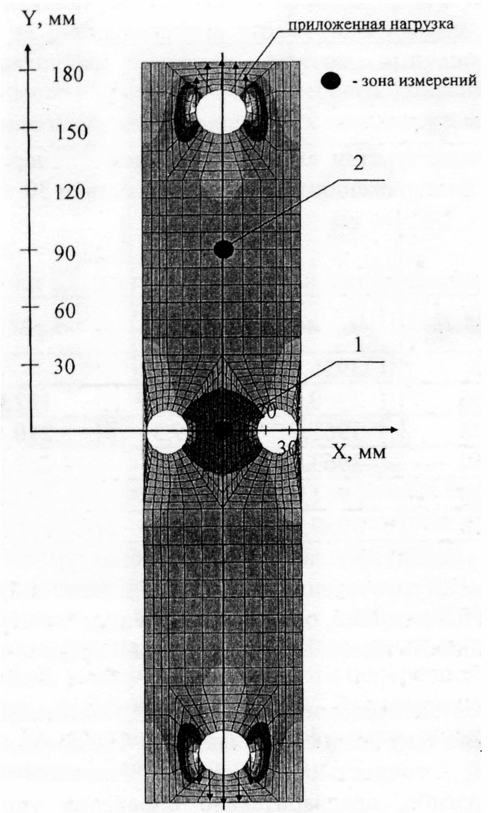


Рис. 10. Вид конечно-элементной модели образца и поле напряжений при нагрузке 40 кН

Таблица 2.

Определение напряжений при двухосном НДС при помощи головных волн

	Нагрузка, кН	σ_x, МПа		$\Delta(\sigma_т)$, %
		Расчет	Измерения	
Нагрузка	20	23	20	0,8
	40	45	44	0,3
	60	68	79	2,8
Разгрузка	60	68	83	3,8
	40	45	58	3,3
	20	23	33	2,5
	Нагрузка, кН	σ_y, МПа		$\Delta(\sigma_т)$, %
		Расчет	Измерения	
Нагрузка	20	58	45	3,3
	40	115	143	7,2
	60	172	187	3,8
Разгрузка	60	172	191	4,8
	40	115	138	5,6
	20	58	42	4,1

σ_x, σ_y – напряжения по соответствующим осям,

$\Delta(\sigma_т)$ – погрешность относительно предела текучести.

Эксперимент, проведенный с целью сравнить результаты определения интегральных значений напряжений по толщине при одноосном НДС, полученные двумя способами:

1) при помощи контактных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) и системы «АСТРОН»;

2) при помощи бесконтактных электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) и прибора АСБАТ,

показал, что достоверность результатов оказалась выше при использовании бесконтактных электромагнитно-акустических преобразователей. Результаты сравнивались по двум критериям: коэффициент вариации средних значений упругоакустических коэффициентов, а также максимальная погрешность рассчитанной величины напряжений относительно предела текучести

Эксперимент проводился на образце из стали класса прочности Х70. При каждом значении нагрузки измерялись величины временных задержек поперечных волн с использованием контактных и бесконтактных преобразователей. После каждого измерения преобразователи снимались с образца, изменялось значение нагрузки, и преобразователи устанавливались вновь.

Образец нагружался от 0 до 300 МПа, а затем разгружался с шагом 50 МПа. Цикл нагрузки-разгрузки повторялся 3 раза.

Уравнение для определения интегрального значения напряжений по толщине:

$$\sigma = D \cdot \Delta A = D(A_0 - A)$$

По каждой серии измерений «Нагрузка» и «Разгрузка» определялись упругоакустические коэффициенты D, рассчитывались средние значения $D_{ср}$, а также коэффициенты вариации средних значений δD и максимальная погрешность полученных напряжений по среднему упругоакустическому коэффициенту относительно предела текучести $\max\Delta(\sigma_т)$ (таблица 3). Погрешность определения интегральных по толщине значений напряжений с использованием бесконтактных ЭМА-преобразователей в 3,5 раза ниже по сравнению с контактными преобразователями.

Таблица 3.

Результаты определения напряжений при помощи ПЭП и ЭМАП

	$D*10^{-4}$, МПа	
	ПЭП	ЭМАП
1.Нагрузка	-5,2	-6,5
2. Разгрузка	-4,2	-6,9
3. Нагрузка	-4,7	-7,0
4. Разгрузка	-4,1	-7,1
5. Нагрузка	3,3	-6,9
6. Разгрузка	-3,2	-7,0
$D_{ср}$	-4,1	-6,9
δD, %	-7	-1
$\max\Delta(\sigma_т)$, %	18,5	5,1

Результаты эксперимента по определению интегральных по толщине значений напряжений с применением комплексного ЭМА-преобразователя представлены на рисунке 11.

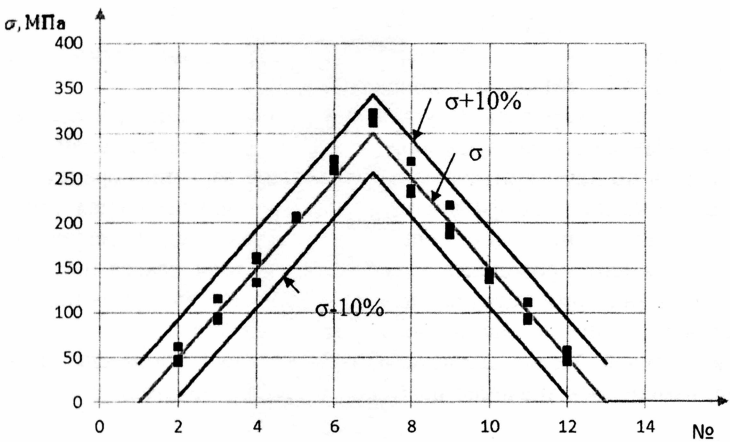


Рис. 11. Результаты расчета напряжений с помощью комплексного ЭМА-преобразователя: σ – реальные значения напряжений; σ+10%, σ-10% - линии, показывающие величину реальных значений напряжений с погрешностью ±10% относительно предела текучести

При использовании комплексного ЭМА-преобразователя максимальная погрешность относительно предела текучести составила 5,1 %.

В пятой главе представлена методика определения напряженно-деформированного состояния линейной части магистрального трубопровода.

Для проведения измерений должен быть сделан шурф. Протяженность шурфа на прямолинейных участках должна быть равной 1,5-ной длине трубы. Вскрытие трубы достаточно осуществлять до средних образующих по обе стороны трубы (т.е. требуется раскопка только верхней части траншеи), т.к. для определения остаточного ресурса участка линейной части магистрального трубопровода при помощи разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана компьютерной программы «Ресурс» достаточно измерить величины напряжений в трех точках по сечению трубопровода. На одной образующей должны быть подготовлены три участка, расположенные на 9, 12 и 3 часа.

Методика определения напряжений в каждой точке предусматривает применение в комплексе объемных волн для определения интегрального значения напряжений по толщине стенки трубопровода, а также головных волн для определения поверхностных значений напряжений.

По результатам государственных приемочных испытаний данная методика и оборудование рекомендованы при проведении обследования технического состояния газопроводов на различных газотранспортных предприятиях ОАО «Газпром».

Основные выводы и результаты

1. Поскольку магистральные газопроводы находятся под действием множества различных видов нагрузок, то для определения их остаточного ресурса, помимо информации о механических и физических свойствах материала, наличии в нем дефектов и их параметров, необходимо знать реальные значений механических напряжений. На данный момент отсутствует экспресс-метод, способный определять механические напряжения на действующем магистральном трубопроводе.

2. Малая применимость метода акустической тензометрии на практике объясняется некорректным измерением относительных акустических параметров упругих волн в объекте контроля из-за наличия слоя контактной жидкости, необходимой при использовании контактных пьезоэлектрических преобразователей, а также несовершенством методики контроля. Чтобы избежать проблем, связанных с контактным методом, предложено использование ЭМА-метода.

3. Анализ чувствительности различных типов волн к действующим напряжениям показал, что в случае определения напряжений с поверхности контролируемого объекта, параллельной плоскости действия напряжений, наиболее чувствительной является головная волна, распространяющаяся вдоль действия нагрузки.

4. Экспериментально подтверждена возможность определения напряжений при двухосном НДС при помощи головных волн с погрешностью, не превышающей 10 % от предела текучести материала.

5. Разработано оборудование АСБАТ и комплексный ЭМА-преобразователь для оперативного бесконтактного определения интегральных по толщине значений механических напряжений.

6. Погрешность определения интегральных по толщине значений напряжений с использованием бесконтактных ЭМА-преобразователей в 3,5 раза ниже по сравнению с контактными преобразователями.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Щипаков Н.А. Применение электромагнитно-акустического способа возбуждения ультразвука для контроля механических напряжений // Сварка и диагностика.-2010.- №4.- С. 55 – 56.

2. Щипаков Н.А., Козлов Д.М. Аппаратное средство бесконтактной акустической тензометрии // Сварка и диагностика.-2010.- №5.- С. 53 – 54.

3. Щипаков Н.А. Оценка напряженного состояния с применением акустической тензометрии // Будущее машиностроения России: Сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. – М., 2010.- С. 113.

4. Алёшин Н.П., Щипаков Н.А., Прилуцкий М.А. Перспективы определения механических напряжений головными волнами // Будущее машиностроения России: Сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов.– М., 2011.- С. 116.

5. Пат. RU 2441230 C1 Российская Федерация, МПК G01N 29/04. Электромагнитно-акустический преобразователь / Н.П.Алёшин, М.А.Прилуцкий, Д.М.Козлов, Н.А.Щипаков; Патентообладатели: Российская Федерация, от имени котор. выступ. Министер. образов.и науки РФ, ФГУ НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана.- № 2010143309/28; заявл. 25.10.2010; опубл. 27.01.2012 // БИ.- 2012.- №3.