

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 539.3

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-4-3-15

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЛЭМБА В СТАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДЕ С ЗАЩИТНЫМ НАРУЖНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Мустафина Г.Р.

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
sogaponenko@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Провести адаптацию метода измерения распространения волн Лэмба в тонких двуслойных пластинах к исследованию зависимости фазовой скорости от технического состояния трубопроводов с защитным наружным покрытием. Выполнить модификацию численно-аналитического алгоритма измерения толщины покрытия и областей несцепления материалов в тонких двуслойных пластинах для виброакустической диагностики технических трубопроводов. Исследовать распространение симметричной волны Лэмба в стальном трубопроводе с защитным наружным покрытием. МЕТОДЫ. Для решения задачи локализации повреждений технических трубопроводов рассмотрены традиционные методы неразрушающего контроля, основанные на виброакустической диагностике. РЕЗУЛЬТАТЫ. Построена математическая модель, описывающая зависимость распространения моды фазовой скорости волны Лэмба от толщины исследуемого объекта. Наличие изменений в толщине трубопровода принято как влияние дефектов материала на параметры распространения моды волны Лэмба. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Представлен численно-аналитический метод расчета распространения симметричной моды волны Лэмба в стальном трубопроводе с защитным наружным покрытием. Представлена зависимость скорости распространения волн Лэмба от толщины исследуемого объекта. На основании описанной методики представляется возможным оценивать не только толщину сегмента и области несцепления слоев, но и суммарную площадь дефектной зоны. Это позволит в дальнейшем фиксировать относительные изменения в толщине стенок трубопроводов для определения изменений физических свойств материала или наличия дефекта.

Ключевые слова: дефект; виброакустический контроль; волна Лэмба; трубопровод.

Для цитирования: Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Мустафина Г.Р. Построение математической модели распространения волн Лэмба в стальном трубопроводе с защитным наружным покрытием // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 4. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-3-15.

CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF LAMB WAVE PROPAGATION IN A STEEL PIPELINE WITH A PROTECTIVE OUTER COATING

SO. Gaponenko, AE. Kondratiev and GR. Mustafina

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
sogaponenko@yandex.ru

Abstract: THE PURPOSE. Adapt the method of measuring the propagation of Lamb waves in thin two-layer plates to the study of the dependence of the phase velocity on the technical condition of pipelines with a protective outer coating. To perform a modification of the

numerical-analytical algorithm for measuring the thickness of the coating and areas of non-adhesion of materials in thin two-layer plates for vibroacoustic diagnostics of technical pipelines. To investigate the propagation of a symmetric Lamb wave in a steel pipeline with a protective outer coating. **METHODS.** To solve the problem of localizing damage to technical pipelines, traditional methods of non-destructive testing based on vibroacoustic diagnostics are considered. **RESULTS.** Work on the construction of a mathematical model of the dependence of the propagation of the phase velocity of the Lamb wave on the thickness of the object under study has been carried out. The numerical analysis of the measurements was carried out using the example of thin two-layer segments of pipelines. The presence of changes in the thickness of the pipeline is taken as the effect of material defects on the propagation parameters of the Lamb wave mode. **CONCLUSION.** A numerical-analytical method for calculating the propagation of a symmetric Lamb wave mode in a thin segment is presented. The dependence of the propagation velocity of Lamb waves on the segment thickness is demonstrated. Based on the described technique, it seems possible to estimate not only the thickness of the segment and the area of non-adhesion of the layers, but also the total area of the defective area. This will allow in the future to record the relative changes in the thickness of the walls of pipelines to determine changes in the physical properties of the material or the presence of a defect.

Keywords: defect; vibro-acoustic monitoring; Lamb waves; pipeline.

For citation: Gaponenko SO, Kondratiev AE. and Mustafina GR. Construction of a mathematical model of lamb wave propagation in a steel pipeline with a protective outer coating. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(4):3-15. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-3-15.

Введение

Применение современных методов неразрушающего контроля обусловлено необходимостью своевременного мониторинга состояния технических трубопроводов [1], которые под влиянием внешних и внутренних факторов эксплуатации подвергаются деградации материала. Слоистые трещины являются одними из трудно выявляемых и скрытных дефектов металлических трубопроводов и это требует принятия эффективных мер их оценки, начиная с их классификационного анализа и уменьшения риска их появления как при реализации технологии производства металлических трубопроводов, так и при анализе их состояния в процессе эксплуатации. Дефекты такого рода приводят к выходу из строя оборудования и потерям энергоносителя или иной подаваемой среды, что выражается в экономических затратах на его замену. Кроме того, замена оборудования требует временной приостановки подачи среды по данному трубопроводу, что также создает дополнительные финансовые расходы [2].

Для решения подобных задач актуальным вопросом остается проведение мониторинга состояния трубопроводов различными методами неразрушающего контроля, применение которых способствует уменьшению возникновения нежелательных последствий от развивающейся со временем деградации материалов трубопроводов. В статье для определения технического состояния трубопроводов ЖКХ, предлагается рассмотреть новый подход, основанный на распространении волн Лэмба в представленных сегментах трубопровода [3]. Сегмент в статье рассматривается как часть трубопровода в разрезе, представляющего собой круг, который ограничен дугой окружности и секущей.

Методы неразрушающего контроля трубопроводных систем, лежащие в основе технических решений задачи обнаружения заглубленных трубопроводов, а также выявления различных дефектов часто находят отражение в работах последних лет. Это связано с тем, что повышение безопасности использования и повышение энергоэффективности непосредственно зависит от мероприятий применения новейших приборов контроля.

Подобные мероприятия осуществления контроля необходимы при строительстве зданий и сооружений, подведении к ним различного рода коммуникаций, а также для достижения требуемых условий безопасности при дальнейшей эксплуатации [4].

На рисунке 1 приведено распределение количества зарегистрированных патентов по методам контроля трубопроводов за период с 2010 по 2020 годы. Одним из

важнейших направлений безопасности является повышение энергоэффективности и надежной эксплуатации различных коммуникаций, которое обеспечивается, в частности, разработкой и внедрением новых более современных способов и приборов контроля их технического состояния.

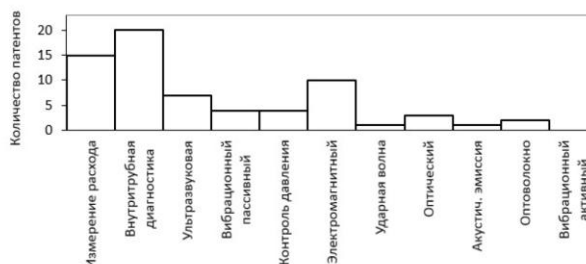


Рис. 1. Распределение количества зарегистрированных патентов по методам контроля трубопроводов за период с 2010 по 2020 годы.

Fig. 1. Distribution of the number of registered patents on pipeline control methods for the period from 2010 to 2020.

Современные методы мониторинга инженерных коммуникаций ограничены избирательной способностью и имеют небольшой спектр возможностей контроля, зависящий от материала исследуемого объекта.

Одним из примеров неразрушающего контроля трубопроводов, описанного в патенте на изобретение № 2734724, является виброакустический способ оценки технического состояния проводящих инженерных коммуникаций. Он представляет собой усовершенствованный акустический метод (рис. 2), суть которого заключается в генерировании волн Лэмба с резонансной частотой, находящейся в диапазоне от 250 до 15000 Гц, при этом регистрация колебаний осуществляется через одинаковые интервалы по всей длине диагностируемого объекта, далее по результатам измерений, регистрируемых чувствительным элементом, строят график распределения амплитуды колебания волны Лэмба по линии измерения [3].

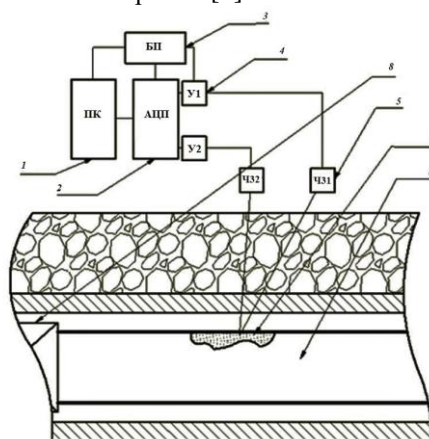


Рис. 2. Экспериментальная схема, состоящая из персонального компьютера (ПК) – 1; аналого-цифрового преобразователя (АЦП) – 2; блока питания – 3; усилителей – 4; чувствительных элементов (микрофоны или пьезоэлектрические датчики) – 5; трубопровода – 6; искомого дефекта – 7; запорно-регулирующего устройства – 8.

Fig. 2. The experimental scheme consisting of a personal computer (PC) – 1; analog-to-digital converter (ADC) – 2; power supply unit – 3; amplifiers – 4; sensitive elements (microphones or piezoelectric sensors) – 5; pipeline – 6; desired defect – 7; shut-off and regulating device – 8.

Виброакустический метод неразрушающего контроля – это метод технической диагностики, позволяющий проводить оценку состояния исследуемого объекта путем анализа проходящих виброакустических сигналов, которые восприимчивы к дефектам и вариативности технического состояния поверхности объекта контроля [5].

Основой для анализа при виброакустическом методе выступают параметры виброакустического сигнала, которые выражены меняющимися во времени физическими величинами (перемещения волны, скорости, ускорения и частоты) [6]. Состояние исследуемого объекта составляется исходя из полученных характеристик виброакустического сигнала, который несет в себе необходимую информацию. Для взаимосвязи технического состояния исследуемого объекта и полученной информации виброакустического сигнала выстраивается аналитическая модель процессов диагностики [5].

Актуальность данного исследования заключается в определении зависимости

параметров волн Лэмба от технического состояния трубопровода.

Научная новизна заключается в проведении теоретических исследований, в построении математической модели, распространения волн Лэмба в двухслойных сегментах в условиях сложных динамических взаимодействий, проявление которых связано с наличием структурных или механических нарушениях в объекте контроля.

Практическая значимость заключается в получении зависимости отношения скоростей, распределения волн Лэмба, от толщины исследуемого двухслойного сегмента, который ляжет в основу разработки перспективных методик оценки технического состояния трубопровода.

Материалы и методы

Применение волн Лэмба в технической диагностике

Приводя в работе описание метода диагностики трубопроводов путем исследования зависимости скорости распространения волн необходимо разобраться с таким понятием как «волны Лэмба». Волны получили свое имя в честь английского ученого Горация Лэмба, описавшего их в своих работах в начале XX века. Данные волны относятся к нормальным волнам, чьи колебания протекают на внешней оболочке объекта вслед за распространением волны и отвесно ей. Волны Лэмба являются нормальными волнами в упругой пластине со свободными границами. Более сложным является случай распространения волн Лэмба в неоднородной нестационарной диспергирующей среде, который описывается математическим аппаратом удовлетворяющим уравнениям теории упругости с учетом граничных условий поверхности пластины.

Волны Лэмба имеют свойство распространяться как в твердых средах, так и в жидких. Однако дисперсия и мультимодальность в первом случае будет проявляться на порядок сильнее.

Описанные Лэмбом волны бывают двух типов: симметричные и асимметричные (рис. 3). Частицы в симметричных волнах распространяются симметрично от плоскости $Z = 0$, т.е. во всех точках пластины распространение по оси X имеют равные величины, а расположение по оси Z противоположно. В асимметричных волнах движение частиц антисимметрично от $Z = 0$ [7].

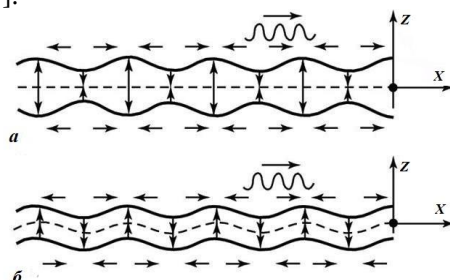


Рис. 3. Схема перемещения частиц на поверхности объекта при движении в них волн Лэмба. *а* - симметричная волна Лэмба, *б* - асимметричная волна Лэмба.

Fig. 3. Scheme of movement of particles on the surface of an object when Lamb waves move in them. *A* - symmetric Lamb wave, *B* - asymmetric Lamb wave

В объекте с определенной толщиной (δ) при неизменяемой частоте (ω) движущиеся симметричные и асимметричные волны Лэмба будут иметь конкретную величину. Каждая из этих волн будет отличаться друг от друга фазовыми и групповыми скоростями. Также в зависимости от изменения толщины пластины различным будет распределение смещения и напряжение. При теоретическом допущении, что исследуемый объект является пластиной малой толщины, волны Лэмба будут представлены продольной и изгибной волнами нулевого порядка [7].

Течение волны Лэмба осуществимо также в пластинах искривленного, неоднородного характера, а также в пластинах, вырезанных из кристаллов [8].

Волны Лэмба нашли широкое применение в методах неразрушающего контроля благодаря своему свойству сохранять скорость на больших протяженностях исследуемого объекта из твердых материалов.

В наше время физика распространения волн Лэмба отражена в методах дефектоскопии и контроля пластинчатых материалов и конструкций. Особенно широкое применение для выявления дефектов в материалах, несклеяках многослойных объектов, при определении толщины. Имеет место быть применение волн Лэмба для диагностики в машиностроении и авиации [9], при диагностике ультразвуком, акустической диагностике, диагностике гладкости поверхности цилиндрических поверхностей

различных материалов. Одной из таких работ является исследование распространения волн Лэмба на поверхности стеклопластиковой трубы, состоящей из композитных материалов. Проведенные авторами эксперименты позволили построить зависимости амплитуды распространения волны от состояния трубопровода, имеющего как явные дефекты, так и неровности и шероховатости, которые имеют место быть для труб из композитных материалов такого рода [10].

В дефектоскопии, при диагностике волнами Лэмба при частоте до 10 МГц дополнительно используют волны на ультразвуковых частотах [11]. Это позволяет диагностировать объекты, имеющие большую толщину [12]. При исследовании же объектов малой толщины или при построении теоретических моделей распространения волн Лэмба для удобства расчета дисперсией волны возможно пренебречь. Однако, при увеличении толщины дисперсия волны будет сильно влиять на свойства распространения. К примеру, при сильной дисперсии в исследуемом объекте скорость волны будет гаснуть и расстояние распространения волны от источника будет уменьшаться.

Дисперсия волны Лэмба является полезным свойством для обработки сигналов при дефектоскопии [13], т.е. зависимость фазовой и групповой скоростей от частоты, позволяет построить дисперсионные линии задержки, где время задержки сигнала зависит от частоты. Такие линии задержки и фильтры существуют в частотном интервале 0,1 – 200 МГц [14].

Волны Лэмба являются эффективным инструментом для обнаружения и локализации повреждений в сегментах трубопроводов, поскольку они могут распространяться на относительно большие расстояния. Однако, поскольку расстояние распространения становится больше, временное разрешение сигналов волн Лэмба имеет тенденцию быть ниже из-за их дисперсии и мультимодальных характеристик. Чтобы преодолеть эту трудность, в исследованиях команды Гонконгского политехнического университета были предложены методы обработки сигналов, такие как компенсация дисперсии, двумерное преобразование Фурье и волновое преобразование [15]. Эти подходы эффективно работают для определения времени прихода мод дисперсионной волны или для разложения измеренного сигнала на различные моды, но требуют дополнительного изучения дисперсии и мультимодальных характеристик.

В последние годы временная фокусировка волн Лэмба находит применение при обнаружении повреждений пластинчатых структур. Теоретические исследования выявили, что дисперсионный эффект нулевой асимметричной моды компенсируется при обратном распространении. Также было показано, что сигнал основной моды, полученный посредством процесса обращения времени, сопровождается несколькими боковыми полосами из-за мультимодального эффекта волн Лэмба. Наличие возможного повреждения можно оценить по индексу повреждения, который основан на разнице между входным и восстановленным сигналами в процессе обращения времени. По сути, этот метод может непосредственно обнаруживать только повреждения, расположенные между излучателем и приемником, хотя алгоритм восстановления вероятности был включен в метод обращения времени для преодоления этой трудности [15-16].

В исследованиях д.т.н. Баева А.Р., а также академика, д.т.н. Прохоренко П.П., предложены методы обращения волн Лэмба для локализации повреждений в сегментах трубопроводов без использования базовых данных. Для этого преобразование мод, вызванное повреждением, включается в процесс обращения времени. Двойные преобразователи прикрепляются симметрично на обеих поверхностях трубопровода, чтобы избирательно излучать и принимать симметричные и асимметричные моды самого низкого порядка в низкочастотном диапазоне. Локализация повреждений выполняется путем численного моделирования с обратным временем рассеянной модой рассеянной волны Лэмба.

Сигналы волны Лэмба в сегменте трубопровода с дефектом численно моделируются методом эластодинамического конечного интегрирования, вместо фактического измерения. При этом мода Лэмба, которая соответствует моде испускаемой волны в поврежденном сегменте, не появляются в месте дефекта без извлечения сигналов рассеянной волны с использованием базовых данных для неповрежденной части сегмента трубопровода [16]. Однако предложенный метод, а именно обращение времени рассеянной волны с преобразованием мод, позволяет фокусироваться в месте повреждения без базовых данных. Выявлено, что предложенный способ создает сфокусированные пятна в дефектной зоне трубопровода, размеры которых связаны с размером дефекта и половиной длины волны моды обращения

времени волной. Данный способ имеет потенциал для достижения локализации повреждения в относительно сложной структуре трубопроводов, такой как часть сегмента с отверстиями сквозной толщины [15], но нуждается в экспериментальной проверке для обсуждения применимости предлагаемого метода к локализации повреждений для реальных конструкций трубопроводов.

Кроме того, остается вопрос об искажении результатов исследования распространения волн в объектах большой толщины, вызванного в связи с трансформацией волн Лэмба в поверхностные волны Рэлея.

Распространение волн Лэмба в сегменте

Для начала анализа примем толщину сегмента (δ) равной $2d$. Смещение по оси координаты Y равно нулю. При таком расположении частицы будут двигаться вдоль оси X , (рис. 4).

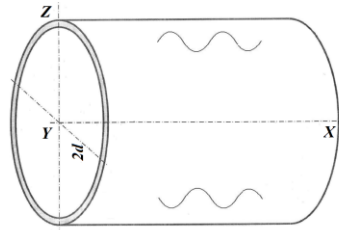


Рис. 4. Геометрия задачи.

Fig. 4. Geometry of the problem.

Вектор смещения частиц $\vec{V}$ представим в следующем виде, где $\vec{j}$ и ψ скалярный (продольных волн) и векторный потенциалы (сдвиговых волн) соответственно:

$$\vec{v} = \text{grad } j + \text{rot } \psi \quad (1)$$

Зависимость потенциалов от координаты Y :

$$\frac{d^2 j}{dx^2} + \frac{d^2 j}{dz^2} + k_l^2 j = 0; \quad (2)$$

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{d^2 \psi}{dz^2} + k_l^2 \psi = 0. \quad (3)$$

Отсюда выведем волновые числа:

$$k_l = 2\pi \bar{v} \sqrt{\frac{\rho}{\lambda_l + 2\mu}}; \quad (4)$$

$$k_t = 2\pi f \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} \quad (5)$$

где k_l и k_t – волновые векторы продольной и сдвиговой волн; ρ – плотность среды; λ_l и 2μ – постоянные упругости.

Компоненты смещения частиц по осям X и Z обозначим как U и W соответственно. Компоненты смещения описывают волны, в которых движение происходит симметрично относительно плоскости $Z=0$, когда в верхней и нижней половинах пластины смещения U имеет одинаковые знаки, а W – противоположные или, во втором случае, когда движение происходит асимметрично относительно той же плоскости $Z=0$ (в верхней и нижней половинах пластины смещения U имеет противоположные знаки, а W – одинаковые).

Представим смещения U и W и напряжения σ_{xx} , σ_{zz} , σ_{xz} через потенциалы:

$$U = \frac{dj}{dx} - \frac{dj}{dz}, \quad W = \frac{dj}{dz} + \frac{d\psi}{dx}; \quad (6)$$

$$\sigma_{xx} = \lambda \left(\frac{d^2 j}{dx^2} + \frac{d^2 j}{dz^2} \right) + 2\mu \left(\frac{d^2 j}{dx^2} - \frac{d^2 \psi}{dx dz} \right),$$

$$\sigma_{zz} = \lambda \left(\frac{d^2 j}{dx^2} + \frac{d^2 j}{dz^2} \right) + 2\mu \left(\frac{d^2 j}{dz^2} + \frac{d^2 \psi}{dx dz} \right),$$

$$\sigma_{xz} = \mu \left(\frac{d^2 j}{dx dz} + \frac{d^2 \psi}{dx^2} - \frac{d^2 \psi}{dz^2} \right). \quad (7)$$

Численные исследования зависимости различных внешних факторов на виброакустические параметры энергетических трубопроводов, согласно [17] стоит начать с выражения для движения волн в сегментах через потенциалы:

$$\Delta j_{,L} + k_l^2 \cdot j_{,L} = 0; \quad (8)$$

$$\Delta \psi_{,L} + k_t^2 \psi_{,L} = 0. \quad (9)$$

Для волн Лэмба (Л) характерна геометрическая дисперсия [18]. Построение дисперсионных кривых фазовых и групповых скоростей дает возможность детального анализа движения в волнах разных номеров. Поскольку δ неизменна по всей протяженности исследуемого сегмента, а длина волны $\lambda = \frac{2\pi C}{\omega} = \frac{2\pi}{k}$, то становится очевидным, что соотношение между длиной волны и толщиной сегмента зависит от ω . Здесь ω – циклическая частота, а C – скорость акустической волны. Поэтому для всех волн в сегменте существует дисперсия [19]. Связь скалярных и векторных потенциалов с компонентами смещения по осям X и Z дается формулами (6) и (7). Компоненты тензора напряжений σ_{ij} на плоскостях сегмента $Z = \pm \delta/2$ должны стремиться к 0. Исходя из этого преобразуем формулы (8) и (9):

$$j = A_S \operatorname{ch} qz e^{ikx} + B_A \operatorname{sh} qz e^{ikx}, \quad (10)$$

$$\psi = D_S \operatorname{sh} qz e^{ikx} + C_A \operatorname{ch} qz e^{ikx}, \quad (11)$$

$$\text{где } q = \sqrt{k^2 - k_l^2}; \quad s = \sqrt{k^2 - k_t^2};$$

A_S, B_A, C_A, D_S – произвольные постоянные;
 k – волновое число волн Лэмба.

Подставляя выражения (10) и (11) в формулы (7) и приравнявая напряжения к нулю, выразим систему линейных однородных уравнений для нахождения максимально и минимально возможных значений A_S, B_A, C_A, D_S :

$$(k^2 + s^2) \operatorname{ch} qd A_S + (k^2 + s^2) \operatorname{sh} qd B_A + 2iksshd C_A + 2ikschsd D_S = 0;$$

$$(k^2 + s^2) \operatorname{ch} qd A_S - (k^2 + s^2) \operatorname{sh} qd B_A - 2iksshd C_A + 2ikschsd D_S = 0;$$

$$2iksshd A_S + 2ikschqd B_A - (k^2 + s^2) \operatorname{ch} sd C_A - (k^2 + s^2) \operatorname{sh} sd D_S = 0;$$

$$-2iksshd A_S + 2ikschqd B_A - (k^2 + s^2) \operatorname{ch} sd C_A + (k^2 + s^2) \operatorname{sh} sd D_S = 0. \quad (12)$$

Данная система удовлетворяется, если удовлетворяются две подсистемы:

$$(k^2 + s^2) \operatorname{ch} qd A_S + 2ikschsd D_S = 0,$$

$$2iksshd A_S - (k^2 + s^2) \operatorname{sh} sd D_S = 0; \quad (13)$$

$$(k^2 + s^2) \operatorname{sh} qd B_A + 2iksshd C_A = 0,$$

$$2ikqchqdB_A - (k^2 + s^2)chsdC_A = 0. \quad (14)$$

При этом волновое число k :

$$(k^2 + s^2)^2 chqdshsd - 4k^2 qsshqdchsd = 0, \quad (15)$$

$$(k^2 + s^2)^2 shqdchsd - 4k^2 qschqdshsd = 0. \quad (16)$$

Зная дисперсионные кривые фазовых скоростей волн Лэмба, можно вычислить смещения и напряжения в волне [17]. Продольные U_{S_0} и поперечные W_{S_0} смещения волны в сегменте имеют вид:

$$U_{S_0} = Ak_t \frac{k_s^2 - s_s^2}{k_s^2 + s_s^2} \times \frac{1}{k_t d} \sin(k_s x - \omega t), \quad (17)$$

$$W_{S_0} = Ak_t \frac{q_s (k_s^2 - s_s^2)}{k_t (k_s^2 + s_s^2)} \times \frac{z}{d} \cos(k_s x - \omega t), \quad (18)$$

$$W_{S_0} = U_{S_0} q_s zctg(k_s x - \omega t). \quad (19)$$

Волнам Лэмба характерна дисперсия скоростей, зависящая от толщины сегмента, параметров упругости материала и частоты волны ω . Из этого можно сделать вывод, что при толщине сегмента (δ), скорость распространения самой быстрой симметричной моды S_0 будет выглядеть как:

$$C_{S_0} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (20)$$

где E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона, для металлов располагается в диапазоне 0,26-0,35; ρ – плотность материала.

Исходя из выведенных выражений в продольных волнах чаще встречаются смещения по оси X с неизменной по длине амплитудой. Продольное смещение при этом значительно больше смещения в поперечном направлении, вызванного за счет эффекта Пуассона [20].

Теоретический анализ

Рассмотрим ситуацию распространения волны Лэмба в трубопроводе с защитным наружным покрытием из ГОСТ 31448-2012 ¹[21]. Настоящий стандарт распространяется на стальные бесшовные, сварные прямошовные и спирально-шовные трубы диаметром от 114 до 1420 мм с наружными защитными покрытиями, нанесенными в заводских условиях.

В качестве объектов исследования были взяты несколько стальных электросварных прямошовных трубопроводов из ГОСТ 10704-91 ²[22] с толщиной стенок (δ) 2,2; 3,5; 4,5; 5 мм и с нанесенными на нее защитным (полиэтиленовым) покрытием с толщиной 2; 2,2; 2,5 и 3 мм. Трубопроводы выполнены из стали со свойствами материала: $\mu = 0,28$; $E = 2,2 \cdot 10^5$ МПа и $\rho = 7,85 \cdot 10^4$ кг/м³, а наружное защитное (полиэтиленовое) покрытие со свойствами: $\mu = 0,42$, $E = 770$ МПа и $\rho = 9,65 \cdot 10^2$ кг/м³.

Основные характеристики материалов рассматриваемых трубопроводов с защитными наружными покрытиями приведены в табл.1.

Таблица 1

Основные характеристики материалов трубопроводов с защитными наружными покрытиями

Материал	E	μ	ρ	Толщина, δ			
	МПа		кг/м ³	мм			
Монослойное полиэтиленовое покрытие, δ_1	770	0,42	$9,65 \cdot 10^2$	1	2	3	3,5

¹ ГОСТ 31448-2012 «Трубы стальные с защитными наружными покрытиями для магистральных газонефтепроводов. Технические условия» от 05 июня 2013 г. // М.: Стандартинформ, 2013 год.

² ГОСТ 10704-91 «Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент (с Изменениями N 1, 2, 3)» от 15 ноября 1991 г. // М.: Стандартинформ, 2007 год.

Сталь, δ_2	$2,2 \cdot 10^5$	0,28	$7,85 \cdot 10^4$	2,2	3,5	4,5	5
-------------------	------------------	------	-------------------	-----	-----	-----	---

Размеры для обоих слоев приняты исходя из используемого в ТЭК и ЖКХ трубопровода из легированной стали с монослойным полиэтиленовым антикоррозионным покрытием «МЕТАЛЕН ПЭ-21». Подобные размеры приняты только в целях удобства расчета с учетом сохранения условия возникновения волн Лэмба: соизмеримость толщины слоя с длиной объемной волны в слое.

Материалы отличаются упругими свойствами друг от друга, поэтому выполняется условие:

$$\{(k_t)_1 \delta_1, (k_t)_2 \delta_2\} = 1, \quad (21)$$

При удовлетворении условия (21) и наличии дефекта, к примеру отсутствия сцепления между слоями, в стальной основе сегмента и в покрытии по-отдельности будет распространяться S_0 -мода со скоростями $(C_{S_0})_1$ и $(C_{S_0})_2$, определяемыми формулой (20), для основного и наружного слоя соответственно.

Также примем выполнение условия жесткого сцепления поверхностей контактов материалов сегмента, а именно:

$$\begin{aligned} (\sigma_{ij})_1 &= (\sigma_{ij})_2; \\ (U_{S_0})_1 &= (U_{S_0})_2; \\ (W_{S_0})_1 &= (W_{S_0})_2 \text{ при } z=0 \end{aligned} \quad (22)$$

Обобщим параметры для обоих слоев:

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{E_1^{-1} \delta_1 + E_2^{-1} \delta_2}; \\ \mu &= \mu_1 \delta_1 + \mu_2 \delta_2; \\ \rho &= \rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\text{где } \delta_1 = \frac{\delta_1}{\delta}, \delta_2 = \frac{\delta_2}{\delta}.$$

Так как $\delta_{12} = \frac{\delta_1}{\delta_2}$ соответствует промежутку от 0 до 1, то формула (20) имеет вид:

$$C_{S_0} \approx \sqrt{\frac{E_2}{\rho_2} \left[1 - \frac{\delta_1}{2} (E_{21} + \rho_{12}^{-2}) \right] \left(1 + \frac{\mu_2^2}{2} \right)}. \quad (24)$$

Результаты

В целях анализа изменения толщины сегмента решим задачу, где допустим, что на торце трубопровода расположен излучатель. На поверхности трубопровода, на постоянной длине между ними $L=80$ мм расположены два пьезоэлектрических датчика, которые регистрируют проходящий сигнал от излучателя. При известном значении времени между двумя датчиками $t_{12}=0,1$ с найдем скорость исследуемой моды из $C_{S_0}^* = \frac{L}{t_{12}}$.

Выразим из формулы (24) δ_1 , которая будет равна:

$$\delta_1 \approx \left(\frac{C_{S0}^*}{(1 + \frac{\mu_2^2}{2}) \sqrt{\frac{E_2}{\rho_2}}} + 1 \right) \frac{1}{(E_{21} + \rho_{12}^{-2})}, \quad (25)$$

Полученные расчетным путем данные распространения волны Лэмба в стальном сегменте с монослойным полиэтиленовым покрытием, представляют собой монотонно убывающую кривую, где $\Delta C_{S0} = C_{S0} - C_{S0}^*$, представленную на рис. 5.

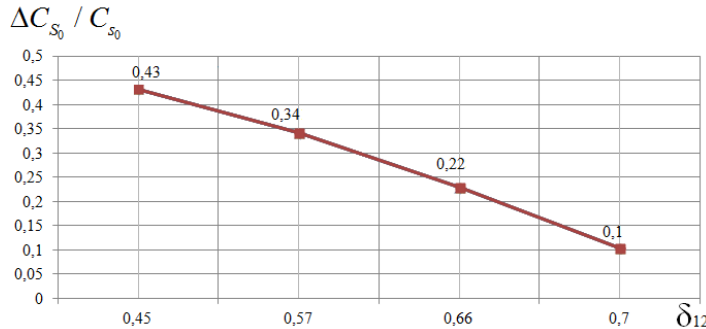


Рис. 5. Отношение скоростей распространения волны от толщины сегмента.

Fig. 5. Speed ratio of the wave propagation velocity on the segment thickness

Применив описанную выше методику становится возможным не только определять изменения в геометрической толщине объекта, но и контролировать изменения в структуре многослойных объектов при несцеплении и определять общую площадь зоны дефекта.

Уравнение площади дефектной зоны будет представлять собой такое выражение:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^j \Delta S_j = j d \frac{\Delta C_{S0}}{C_{S0}^* (C_{S0})_2} t_2 \sum_{i=1}^{i_0} d \left(\frac{t_{nj}}{t_2} - 1 \right) \quad (26)$$

где d — ширина, i — численность зон, l_i — протяженность дефектной зоны, t_2 — время распространения волны, t_{nj} — время перемещения волны на поверхности объекта [30].

Обсуждение

Известны работы Отечественных и зарубежных авторов, посвященные исследованиям распространения волн Лэмба в пластинах различных конфигураций. Речь шла об однородных материалах переменной толщины и формы. В этих же работах рассмотрены вопросы влияния различных структурных и механических нарушений в виде областей несцепления материала на параметры волн Лэмба.

Проведена адаптация метода измерения распространения волн Лэмба в тонких пластинах. Определена зависимость фазовой скорости волны Лэмба от технического состояния трубопроводов с защитным наружным покрытием.

Приведенная математическая модель вычисления зависимости параметров волны Лэмба от толщины исследуемого трубопровода позволяет оценивать не только толщину сегмента и области несцепления слоев, но и суммарную площадь дефектной зоны. Это позволит в дальнейшем фиксировать относительные изменения в толщине стенок трубопроводов для определения изменений физических свойств материала или наличия дефекта. В дальнейшем планируется проведение эксперимента на стеклопластиковом трубопроводе путем измерения значений амплитуды смещения при заданной частоте волны по поверхности трубопровода. Используя формулу (26) представляется возможным определить конкретную площадь данной дефектной зоны.

Заключение

Таким образом, была определена зависимость параметров волн Лэмба от технического состояния трубопровода. С этой целью построена математическая модель распространения волн Лэмба в условиях сложных динамических взаимодействий, вызванных наличием структурных или механических нарушений в трубопроводах.

В итоге получена зависимость отношения скоростей распространения волн Лэмба от толщины исследуемого двухслойного сегмента объекта контроля.

Результаты выполненной работы позволяют применять математическую модель для вычисления зависимости параметров волны Лэмба от толщины исследуемого двухслойного объекта. В целях наглядности и упрощения задачи в качестве исследуемого трубопровода рассматривался тонкий сегмент, что позволило ограничиться в расчетах только самой быстрой нулевой симметричной модой скорости. Проведенный анализ позволил построить

график распространения волны, который демонстрирует, что с ростом отношения C_{s_0} к ΔC_{s_0} зависимость от толщины исследуемого объекта представляет собой монотонно убывающую кривую. Определяя отношение между $\rho_2 E_2$ и $\rho_1 E_1$, становится возможным делать вывод о наличии структурных и механических нарушений в трубопроводе. Развивая данную методику, можно контролировать изменения в толщине стенки трубопроводов для определения изменений физических свойств материала и наличия дефекта.

Литература

1. Шакурова Р.З., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Методика проведения оперативного диагностирования трубопроводов энергетических систем и комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 188–201.
2. Ваньков Ю.В., Запольская И.Н., Гапоненко С.О., и др. Повышение надежности транспортировки тепловой энергии до потребителей в условиях модернизации системы горячего водоснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. № 4(48). С. 29–37.
3. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Шакурова Р.З. Виброакустический способ оценки технического состояния проводящих инженерных коммуникаций. Патент РФ на изобретение № 2734724 22.10.2020. Бюл. № 30. Доступно по: <https://www.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=5a1be950e10cd875a3d6f811fa3b72a8> html. Ссылка активна на 12.05.2022.
4. Шакурова Р.З., Гапоненко С.О. Повышение надежности работы энергетических систем путем определения технического состояния трубопроводов // Материалы XIV Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». Казань: Казанский государственный энергетический университет. 2019. Т. 2 (2). С. 184-187.
5. Open Access Portal of Nondestructive Testing (NDT). Доступно по: <https://www.ndt.net/index.php>. Ссылка активна на 12.05.2022.
6. Генкина М.Д., Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З., и др. Вибродиагностика. М: Диагностика, 2003. 284 с.
7. Физическая энциклопедия academic.ru. Доступно по: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/3739/%D0%9B%D0%AD%D0%9C%D0%91%D0%90. Ссылка активна на 12.05.2022.
8. Лэмба волны. Реальная Физика. Глоссарий по физике. Доступно по: <http://bourabai.ru/physics/2005.html> Ссылка активна на 12.05.2022.
9. Ангелов Г.С., Ермолов И.Н., Марков А.И. Применение ультразвука в промышленности, М.: Машиностроение, 1975. 240 с.
10. Benmeddour F., Grondel S., Assaad J., et al. Experimental study of the A0 and S0 Lamb waves interaction with symmetrical notches // Ultrasonics. 2009. Vol.49. pp. 202–205.
11. De Cicco G., Morten B., New approach to the excitation of plate waves for piezoelectric thick-film devices, Ultrasonics. 2008. V.48. pp. 697–706.
12. De Cicco G., Morten B., Potel C., et al. Lamb wave attenuation in a rough plate // I. Analytical and experimental results in an anisotropic plate, J. Appl. Phys. 2008. V.104, №7. pp. 10.
13. Викторov И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 169 с.
14. De Cicco G., Morten B., Potel C., et al. A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2003. V.50. pp.419–427.
15. Ибадов А.А., Кондратьев А.Е., Гапоненко С.О. Исследование зависимости фазовой скорости волн Лэмба от технического состояния трубопроводов ЖКХ // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : Материалы 92-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. 2020. С. 283-287.
16. Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., et al. Improving the efficiency of energy complexes and heat supply systems using mathematical modeling methods at the operational stage. E3S Web of Conferences. 2019. pp. 124-129.
17. Викторov И.А., Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.
18. Энциклопедия химии и физики. Дисперсия волн. Доступно по: https://femto.com.ua/articles/part_1/1047.html. html Ссылка активна на 08.11.2021.

19. Золотова О.П., Бурков С.И., Сорокин Б.П. Распространение волн Лэмба и SH-волн в пластине пьезоэлектрического кубического кристалла // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics 2010. Т. 2 №3, С. 185-204.

20. Баев А.Р., Прохоренко П.П. Особенности распространения волн Лэмба в тонких двухслойных материалах // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. 2008. № 4. С. 52-55.

21. Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Kondratiev A.E., Dimova R. Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes. E3S Web of Conferences : 2019. pp. 21.

Авторы публикации

Гапоненко Сергей Олегович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет.

Кондратьев Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет.

Мустафина Гульфия Равиловна – студент Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Shakurova RZ, Gaponenko SO, Kondratiev AE. Technique for operational diagnosis of pipelines of energy systems and complexes. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2020; 22(6):188-201. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-6-188-201>.

2. Vankov YuV, Zapolskaya IN, Gaponenko SO, et al. Improving the reliability of transportation of heat energy to consumers in the context of modernization of the hot water supply system. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2020;4(48):29–37.

3. Gaponenko SO, Kondratiev AE, Shakurova RZ. *Vibroacoustic method for assessing the technical condition of conducting engineering communications*. RF patent for invention No. 2734724 10/22/2020. Bull. No. 30. Available at: <https://www.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=5a1be950e10cd875a3d6f811fa3b72a8>. Accessed: 12 May 2022.

4. Shakurova RZ, Gaponenko SO. Improving the reliability of energy systems by determining the technical condition of pipelines. Materials of the XIV International Youth Scientific Conference «Tinchurin Readings». Kazan: Kazan State Power Engineering University. 2019;2 (2):184-187.

5. Open Access Portal of Nondestructive Testing (NDT). Available at: <https://www.ndt.net/index.php>. Link active on 11/08/2021. Accessed: 08.Nov.2021.

6. Genkina MD, Rosenberg GSh, Madorskiy EZ, et al. Vibration diagnostics. M: Diagnostics, 2003. 284 p.

7. Physical encyclopedia academic.ru. Available at: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/3739/%D0%9B%D0%AD%D0%9C%D0%91%D0%90. Accessed: 11 Aug 2021.

8. Lamb waves. Real Physics. Glossary of Physics. Available at: <http://bourabai.ru/physics/2005>. Accessed: 11 Aug 2021.

9. Angels G.S., Ermolov I.N., Markov A.I. The use of ultrasound in industry, Moscow: Mashinostroenie, 1975. 240 p.

10. Benmeddour F, Grondel S, Assaad J, et al. Experimental study of the A0 and S0 Lamb waves interaction with symmetrical notches. *Ultrasonics*. 2009;49:202-205.

11. De Cicco G., Morten B., New approach to the excitation of plate waves for piezoelectric thick-film devices, *Ultrasonics*. 2008;48:697-706.

12. De Cicco G, Morten B, Potel C, et al. Lamb wave attenuation in a rough plate. I. Analytical and experimental results in an anisotropic plate, *J. Appl. Phys*. 2008;104(7).

13. Viktorov IA. *Physical foundations of the application of Rayleigh and Lamb ultrasonic waves in technology*. Moscow: Nauka, 1966.169 p.

14. De Cicco G, Morten B, Potel C, et al. *A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2003;50:419-427.
15. Ibadov AA, Kondratiev AE, Gaponenko SO. *Investigation of the dependence of the phase velocity of Lamb waves on the technical state of pipelines of housing and communal services*. Methodological issues of research on the reliability of large energy systems: Proceedings of the 92nd meeting of the International Scientific Seminar. Yu.N. Rudenko. 2020. P. 283-287.
16. Gaponenko SO, Shakurova RZ. et al. *Improving the efficiency of energy complexes and heat supply systems using mathematical modeling methods at the operational stage*. E3S Web of Conferences. 2019. pp. 124-129.
17. Viktorov IA. *Sound surface waves in solids*. Moscow: Nauka, 1981. 287 p.
18. *Encyclopedia of Chemistry and Physics*. Dispersion of waves. Available at: https://femto.com.ua/articles/part_1/1047.html. Accessed: 11 Aug 2021.
19. Zolotova OP, Burkov SI, Sorokin BP. Propagation of Lamb and SH-waves in a piezoelectric cubic crystal plate. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics* 2010;2(3):185-204.
20. Baev AR, Prokhorenko PP. Features of the propagation of Lamb waves in thin two-layer materials. *Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal*. 2008;4:52-55.
21. Gaponenko SO, Shakurova RZ, Kondratiev AE, Dimova R. *Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes*. E3S Web of Conferences : 2019. pp. 21

Authors of the publication

Sergey O. Gaponenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Aleksandr E. Kondratiev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Gulfiya R. Mustafina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено	16.06.2022 г.
Отредактировано	17.06.2022 г.
Принято	22.06.2022 г.