DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-212-221

Определение скорости крутильной волны по данным спектра акустической эхограммы серии многократных отражений

В.А. Стрижак, Р.Р. Хасанов

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

Поступила 14.05.2025
Принята к печати 18.08.2025

Современные технические средства, в том числе использующие компьютеризированные компоненты, предоставляют новые возможности обработки сигналов с использованием спектрального анализа. Описан способ расчёта скорости акустической волны C по спектру эхограммы, содержащей многократные отражения акустических импульсов. Способ основан на выявлении спектральных линий, отстоящих друг от друга по частотной оси на величину Δf, соответствующую частоте следования импульсов, многократно отражённых от торца объекта контроля. Скорость C рассчитывается как среднее значение $C = L\Delta f$, где L – длина акустической оси. Поиск спектральных линий ведётся в частотной области, соответствующей рабочей зоне входного тракта системы регистрации. Для точного определения положения максимума спектральной линии проведена его аппроксимация параболой. Произведён расчёт скорости крутильной волны в партии труб – заготовок плунжера глубинного штангового насоса длинами от 5,245 до 5,248 м, диаметром 59 мм и толщиной стенки 13,75 мм, в количестве 20 штук. Прозвучивание выполнено с использование электромагнитно-акустического датчика, установленного на внешней поверхности трубы рядом с торцом. Измерение выполнено дефектоскопом АДНШ-П с полосой пропускания приёмного тракта от 9,5 до 63 кГц по уровню -6 дБ. Эхограммы получены на частоте дискретизации 3,75 МГц и содержат 10 отражений. Скорости крутильной волны у труб в партии лежат в интервале от 3294 до 3298 м/с.

Ключевые слова: скорость акустической волны, крутильная волна, длинномерный объект, спектры акустических сигналов

Адрес для переписки:
Стрижак В.А.
Ижевский государственный технический университет,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: str@istu.ru

Address for correspondence:
Strizhak Victor
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: str@istu.ru

Для цитирования:
В.А. Стрижак, Р.Р. Хасанов.
Определение скорости крутильной волны по данным спектра акустической эхограммы серии многократных отражений.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 3. С. 212–221.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-212-221

For citation:
Victor Strizhak, Khasanov RR.
Determination of the Velocity of a Torsional Wave Based on the Spectrum of an Acoustic Echogram of a Series of Multiple Reflections.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(3):212–221. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-212-221

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-212-221

Determination of the Velocity of a Torsional Wave Based on the Spectrum of an Acoustic Echogram of a Series of Multiple Reflections

Victor Strizhak, R.R. Khasanov

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

Received 14.05.2025
Accepted for publication 18.08.2025

Abstract

Modern technical means, including those using computerized components, provide new signal processing capabilities using spectral analysis. A method for calculating the velocity of an acoustic wave C from the spectrum of an echogram containing multiple reflections of acoustic pulses is described. The method is based on the detection of spectral lines spaced from each other along the frequency axis by Δf, corresponding to the pulse repetition rate repeatedly reflected from the testing object's end. The velocity C is calculated as the average value $C = L\Delta f$, where L is the length of the acoustic axis. The search for spectral lines is carried out in the frequency domain corresponding to the working area of the input path of the registration system. To accurately determine the position of the maximum of the spectral line, it is approximated by a parabola. The velocity of the torsional wave was calculated in a batch of pipes – blanks of a plunger of a deep rod pump with lengths from 5.245 to 5.248 m, a diameter of 59 mm and a wall thickness of 13.75 mm, in the amount of 20 pieces. The sounding is performed using an electromagnetic acoustic sensor mounted on the outer surface of the pipe next to the end face. The measurement was performed with an ADNSH-P flaw detector with a receiving path bandwidth from 9.5 to 63 kHz at a level of -6 dB. The echograms were obtained at a sampling frequency of 3.75 MHz and contain 10 reflections. The torsional wave velocities of the pipes in the batch range from 3294 to 3298 m/s.

Keywords: acoustic wave velocity, torsional wave, a long-dimensional object, acoustic signal spectra

Адрес для переписки:
Стрижак В.А.
Ижевский государственный технический университет,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: str@istu.ru

Address for correspondence:
Strizhak Victor
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: str@istu.ru

Для цитирования:
В.А. Стрижак, Р.Р. Хасанов.
Определение скорости крутильной волны по данным спектра акустической эхограммы серии многократных отражений.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 3. С. 212–221.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-212-221

For citation:
Victor Strizhak, Khasanov RR.
Determination of the Velocity of a Torsional Wave Based on the Spectrum of an Acoustic Echogram of a Series of Multiple Reflections.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(3):212–221. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-212-221

Введение

Задача точного определения скорости акустической волны является важной как для дефектоскопии, так и для структуроскопии материалов и изделий [1–3]. В задачах измерения толщины изделия значение скорости акустической волны является исходной величиной при расчёте результирующего параметра. При дефектоскопии значение скорости акустической волны является важным параметром и используется не только для определения координат дефектов [4–6], но и является браковочным критерием. Например, в отдельных случаях скорость в дефектной области контролируемого объекта уменьшается в сравнении со скоростью в бездефектной области [7, 8]. При структуроскопии, тензометрии, определении напряжённо-деформированного состояния численное значение скорости акустической волны является ключевым параметром в силу её связи как со свойствами исследуемого материала [9–11], так и с влиянием на контролируемый объект внешних факторов, включая, например, приложенное усилие [12, 13] или температуру [14].

Широко используемые методы расчёта скорости акустической волны эхо-импульсным методом основаны на измерении времени распространения акустического импульса при известной величине зоны прозвучивания. Измерение временного интервала реализуют в зависимости от выбранного режима измерения времени (между фронтами, пиками, переходами через ноль, центрами масс сигнала, максимумами огибающей и др.) [15, 16] либо по частоте автоциркуляции акустических импульсов на известной базе [17]. Для увеличения точности измерения временного интервала сигналы многократно усредняют [18], удлиняют прозвучиваемую зону за счёт получения многократных отражений [19–21], рассчитывают сдвиг между импульсами по максимуму коэффициента корреляции между ними [22–24], регистрируют момент набега фазы отражённого сигнала относительно опорного (Патент РФ № 2436050), корректируют амплитуды сигналов (Патент РФ 2490606), создают сигналы специальной формы (Патент РФ № 2773974). Реализуемые схемотехнические решения, как правило, требуют наличия специальных узлов для выделения импульсов, выделения фронтов импульсов, реализации задержек и др. Для всех приведённых методов характерна зависимость результата измерения от наличия помех и искажения импульсов при их распространении по образцу. Для точного лабораторного измерения скорости акустической волны используют спектральный резонансный метод, при котором в специально подготовленном образце генерируют непрерывный акустический сигнал и, изменяя его частоту, добиваются резонанса соответствующего кратности длины волны толщине образца [25]. Способу присуща существенная трудоёмкость проведения измерений.

Существенный вклад в развитие технических средств в области акустического контроля вносят вычислительные компоненты, увеличивающие производительность системы без утраты компактности. Это улучшает как эксплуатационные возможности оборудования, так и открывает новые возможности в области обработки сигналов через активное использование разнообразных математических приёмов. Реализация методов спектрального анализа открывает новые возможности при решении сложных технических задач [26]. Использование спектра при анализе зарегистрированных акустических импульсов применяется как для поиска дефектных участков по спектру отдельных эхосигналов, так и по форме огибающей всего спектра [27, 28]. В задаче измерения внутренних напряжений в металлоконструкциях выявлено [29], что при прозвучивании продольной ультразвуковой волной фаза второй гармоники, полученная разложением эхосигналов во временной ряд Фурье, претерпевает существенное изменение при определённой частоте повторения ультразвуковых импульсов. Это позволяет разработать методику для технического контроля оборудования и диагностики состояния эксплуатируемых металлоконструкций. Недостатком метода является необходимость построения дополнительных электронных цепей, сложность и трудоёмкость проведения измерений с необходимостью подстройки частоты.

Целью работы являлась разработка методики расчёта скорости акустической волны по полученному с высоким разрешением спектру от эхограммы, содержащей импульсы, многократно отражённые от торца объекта, и опробование

предлагаемой методики для определения скорости крутильной волны при реализации волноводного контроля партии труб-заготовок плунжера глубинного штангового насоса.

Используемые подходы

Для расчёта скорости акустической волны необходимо измерение временного интервала с высоким разрешением по времени. Выделение временного интервала между зарегистрированными акустическими импульсами реализуется на аппаратном или программном уровне. Анализу подвергается либо интервал времени между зондирующим и любым отражённым импульсом, либо временной интервал между любыми двумя отражёнными импульсами Δt. При значительном количестве отражённых импульсов (многократные отражения) в условиях отсутствия дисперсии скорости частота следования отражённых импульсов обратно пропорциональна временному интервалу между двумя соседними импульсами. В спектре зарегистрированного сигнала информация о частоте следования отражённых импульсов будет представлена спектральными линиями с шагом $\Delta f = 1/\Delta t$. При этом поиск спектральных линий необходимо вести в частотной области работы приёмного тракта, несмотря на то, что частота следования донных импульсов находится существенно ниже. Спектральные линии следуют с шагом Δf и для их выделения необходимо получить спектр в высоком разрешении по частоте.

Алгоритм определения скорости акустической волны состоит из следующих основных этапов: возбуждение акустических импульсов, регистрация эхограммы импульсов, многократно прошедших по объекту контроля, расчёт спектра всей зарегистрированной эхограммы с высоким разрешением по частоте, выделение спектральных линий, соответствующих периоду следования донных импульсов, и расчёт интервалов между ними Δf_i. При известной длине объекта прозвучивания L для каждого шага по частоте между спектральными линиями Δf_i. рассчитывается скорость $C_i = L \times \Delta f_i$. соответствующая i-у интервалу. Результатом определения скорости C является среднее значение по рассчитанным скоростям C_i.

Пример реализации метода

Предлагаемый алгоритм использован для определения скорости крутильной волны [30–32] в партии из 20 труб – заготовок плунжера глубинного штангового насоса [33, 34] длиной в диапазоне от 5,245 м до 5,248 м, диаметром 59 мм и толщиной стенки 13,75 мм из стали марки 17ГС. Прозвучивание проведено с использованием нормальной осесимметричной крутильной волны, распространяющейся в длинномерном объекте, при этом акустический импульс возбуждается с торца объекта, проходит по телу трубы и, отразившись от противоположного торца, возвращается к преобразователю, где и регистрируется. Прозвучивание выполнено с использование электромагнитно-акустического датчика, установленного на внешней поверхности трубы рядом с торцем [35, 36]. Измерение выполнено с использованием дефектоскопа АДНШ-П (внесён в реестр средств измерения, рег. № 82936-21), входящего в уникальную научную установку «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. № 586308). В качестве примера представлены результаты прозвучивания образца № 7 длиной L = 5,427 м.

На рисунке 1 показана зарегистрированная эхограмма.

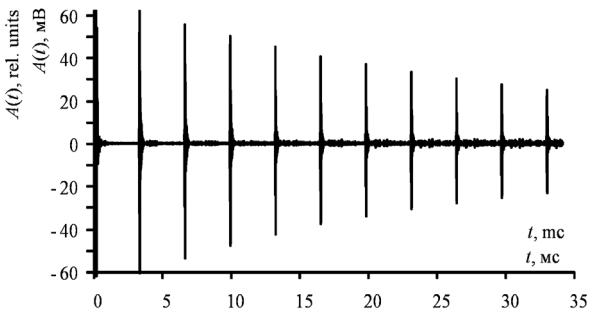

Рисунок 1 – Эхограмма зарегистрированного сигнала при прозвучивании трубы длиной 5,427 м крутильной волной

Figure 1 – An echogram of the recorded signal when a pipe with a length of 5.427 m is sounded by a torsional wave

Сигнал усиливается приёмным трактом дефектоскопа и через плату аналого-цифрового преобразователя передаётся

в компьютер. Полоса приёмного тракта системы регистрации лежит в диапазоне от 9,5 до 63 кГц по уровню -6 дБ. Эхограмма получена с частотой дискретизации 3,75 МГц (128 тысяч точек) и демонстрирует сигнал от многократного переотражённого в трубе акустического импульса.

На рисунке 2 изображён спектр всего зарегистрированного сигнала, полученный с использованием быстрого преобразования Фурье. Расчёт произведён в программной среде MathCAD.

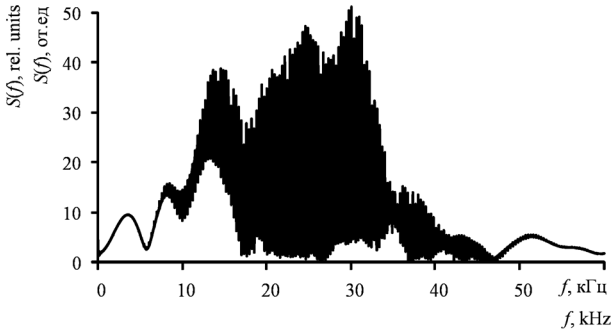

Рисунок 2 – Спектр зарегистрированного сигнала от эхограммы с многократно переотражёнными донными импульсами

Figure 2 – The spectrum of the recorded signal from an echogram with repeatedly reflected bottom pulses

Для получения спектра с высоким разрешением по частоте эхограмма зарегистрированного сигнала дополнена нулями. Разрешение по частоте в спектре составило около 3,6 Гц. На рисунке 3 показан фрагмент спектра в узком диапазоне частот. Благодаря высокому разрешению по частоте наблюдаются регулярные спектральные линии, отстоящие друг от друга на расстоянии Δf, соответствующем частоте следования донных импульсов.

Для исключения влияния частотных свойств приёмного тракта полученный спектр зарегистрированного сигнала подвергнут дополнительной фильтрации с использованием низкочастотного фильтра (рисунок 4). Выделение анализируемых спектральных линий произведено по уровню минус 12 дБ от максимального значения в спектре.

Фрагмент полученного спектра показан на рисунке 5, где точками показаны отдельные рассчитанные значения.

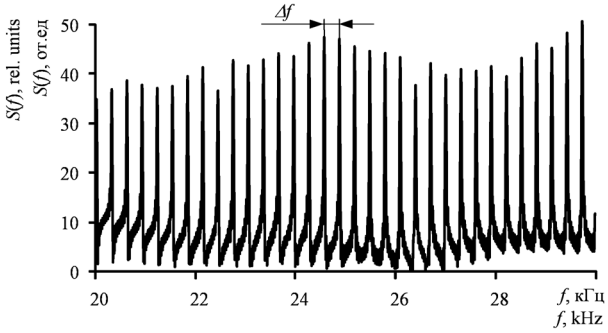

Рисунок 3 – Фрагмент спектра зарегистрированного сигнала от эхограммы с многократно переотражёнными донными импульсами в диапазоне частот от 20 кГц до 30 кГц

Figure 3 – A fragment of the spectrum of the recorded signal from an echogram with repeatedly reflected bottom pulses in the frequency range from 20 kHz to 30 kHz

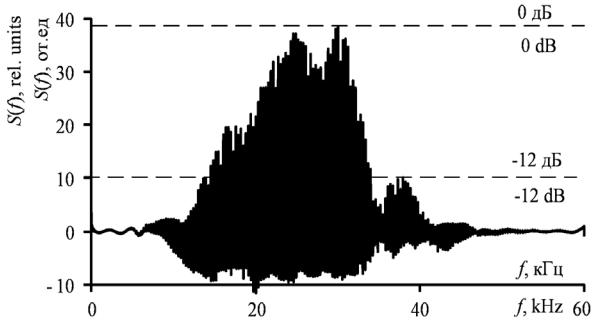

Рисунок 4 – Модифицированный спектр зарегистрированного сигнала после фильтрации с использованием низкочастотного фильтра

Figure 4 – Modified spectrum of the recorded signal after filtering using a low-pass filter

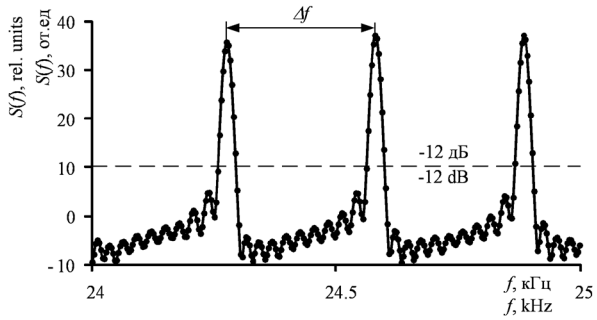

Рисунок 5 – Выделение разницы частот между соседними спектральными линиями Δf в спектре зарегистрированного сигнала от эхограммы с многократно переотражёнными донными импульсами

Figure 5 – Determining the frequency difference between adjacent spectral lines Δf in the spectrum of the recorded signal from an echogram with repeatedly reflected bottom pulses

Для исследуемого объекта контроля длиной L и ожидаемой скорости крутильной волны около $C = 3200$ м/с частота следования донных импульсов при многократном отражении составляет $\Delta f \approx 295$ Гц. Между соседними спектральными линиями расчётное количество точек не превышает значения 82, что в свою очередь не позволяет достаточно точно определить значение Δf. Для более точного определения интервала Δf между соседними спектральными линиями значение частоты в точке максимума спектральной линии аппроксимировано параболой.

По известной длине трубы L и каждому интервалу Δf_i в спектре зарегистрированного сигнала рассчитано значение скорости $C_i = L \times \Delta f_i$ (рисунок 6). Достоинством метода является значительное количество спектральных линий, попавших в рабочую полосу приёмного тракта. Для представленного образца, в соответствии с методикой селекции спектральных линий, их анализируемое количество превысило 90 штук. Значительный разброс расчётных значений скорости C_i вызван недостаточным разрешением спектра по частоте. Но большое количество анализируемых интервалов Δf позволяет определить среднее значение скорости в анализируемом образце: $C = 3297{,}2$ м/с. Основной вклад в точность определения скорости C вносит ошибка определения длины трубы ±1 мм. Результирующая точность определения скорости не превышает ±0,6 м/с.

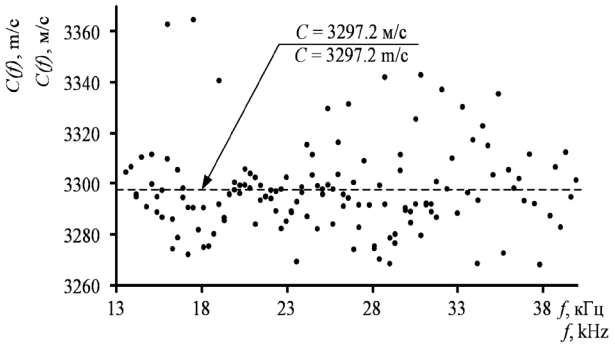

Рисунок 6 – Значения скорости C_i соответствующие разнице частот Δf_i между соседними спектральными линиями в зависимости от частоты f

Figure 6 – The values of the velocity C_i corresponding to the frequency difference Δf_i between adjacent spectral lines as a function of the frequency f

Результаты расчёта скорости акустической волны по представленному алгоритму для всех труб в анализируемом пакете показаны на рисунке 7.

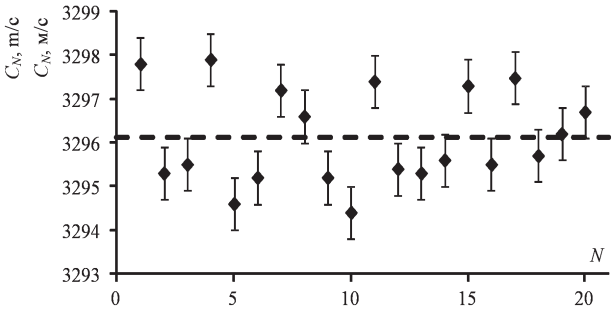

Рисунок 7 – Результаты расчета скорости акустической волны в партии из 20 труб – заготовок плунжера глубинного штангового насоса

Figure 7 – The results of calculating the acoustic wave velocity in a batch of 20 tube blanks of a plunger of a deep rod pump

Несмотря на принадлежность всех труб к одной партии, наблюдается незначительный разброс скоростей от среднего значения в партии (на графике отмечено пунктиром). При этом все результаты укладываются в интервал от 3294 до 3298 м/с.

Заключение

Эхограмма, содержащая многократные отражения акустического импульса от торца объекта контроля, в своём спектре содержит информацию о частоте следования донных импульсов. В спектре, полученном с высоким разрешением, присутствует набор спектральных линий, расположенных с шагом Δf. Шаг Δf соответствует частоте следования донных импульсов, что позволяет по интервалу частот между спектральными линиями Δf и длине объекта контроля L рассчитать значение скорости акустической волны $C = L\Delta f$. В сравнении с временным методом, используемый подход не требует дополнительных приборных узлов и блоков, предназначенных для выделения или модификации сигналов перед их регистрацией. К достоинству предлагаемого подхода можно отнести: использование импульсов, многократно прошедших по объекту контроля, и присутствие в спектре зарегистрированного сигнала значительного набора спектральных линий. Точность расчёта скорости C существенно повышается за счёт усреднения значений,

соответствующих каждой разнице частот Δf между спектральными линиями,. На результат расчёта скорости акустической волны не будут влиять частотные искажения сигнала или помехи и вызванные ими изменения формы донных импульсов.

Благодарности

Выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FZZN-2025-0003 (численное моделирование), и Программы развития научных и научно-педагогических кадров ИжГТУ имени М.Т. Калашникова 2025 г. ЕМС-2025 (экспериментальные исследования).

Список использованных источников

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль: справочник / В.В. Клюев [и др.] // В 7 т. М.: Машино строение, 2004. – Т. 6. – 832 с.

2. Baev A.R. Influence of Geometry and Boundary Conditions in Area of the Cohesion between Materials on the Reflection of an Ultrasonic Beam. Part 2. Features of Experimental Simulation / A.R. Baev [et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2021. – Vol. 12, No. 4. – P. 301–310.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-4-301-310

3. Baev A.R. Possibilities of Using of Surface and Subsurface Waves' Amplitude-Angle Characteristics for Control of Materials with Surface-Hardened Inhomogeneous Layer / A.R. Baev [et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2022. – Vol. 13, No. 4. – P. 263–275.
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-263-275

4. Diogo A.R. A Review of Signal Processing Techniques for Ultrasonic Guided Wave Testing / A.R. Diogo, B. Moreira, C.A.J. Gouveia, J.M.R.S. Tavares // Metals. – 2022. – Vol. 12, No. 6. – P. 936.
DOI: 10.3390/met12060936

5. Стрижак В.А. Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом / В.А. Стрижак, А.В. Пряхин, Р.Р. Хасанов, С.С. Мкртчян // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 78–88.
DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-78-88

6. Zang X. Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection: A review / X. Zang, Zh.D. Xu, H. Lu, Ch. Zhu, Zh. Zhang // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2023. – Vol. 206. – P. 105033.
DOI: 10.1016/j.ijpvp.2023.105033

7. Муравьева, О.В. Распространение нормальных акустических волн в валах центробежных насосов с продольными трещинами осевых отверстий / О.В. Муравьева, П.А. Шихарев, С.А. Мурашов // Контроль. Диагностика. – 2024. – Т. 27, № 1(307). – С. 14–29. **DOI:** 10.14489/td.2024.01.pp.014-029

8. Baev A.R. Peculiarities of Optoacoustic Excitation and Propagation of Plate Waves in Thin-Walled Objects / A.R. Baev [et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2023. – Vol. 14, No. 4. – P. 233–241.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-233-241

9. Муравьев, В.В. Акустические и электромагнитные свойства заготовок стволов гражданских ружей / В.В. Муравьев [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21, № 1. – С. 59-70. **DOI:** 10.22213/2410-9304-2023-1-59-70

10. Муравьев, В.В. Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн / В.В. Муравьев, А.Ю. Будрин, М.А. Синцов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 2. – С. 37–43. **DOI:** 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43

11. Muraveva O.V. Thermal Treatment Effect and Structural State of Rod-Shaped Assortment 40Kh Steel on the Speed of Ultrasound Waves and Poisson Coefficient / Muraveva O.V. [et al.] // Steel in Translation. – 2020. – Vol. 50, No. 8. – P. 579–584.
DOI: 10.3103/S0967091220080082

12. Муравьева О.В. Акустические свойства мартенситно-стареющей стали ХМ-12 после энергетических воздействий / О.В. Муравьева [и др.] // Frontier Materials & Technologies. – 2024. – № 2. – С. 87–100.
DOI: 10.18323/2782-4039-2024-2-68-8

13. Баев А.Р. Особенности распространения поверхностных и подповерхностных волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 2. Упрочненный неоднородный поверхностный слой / А.Р. Баев, А.Л. Майоров, Н.В. Левкович, М.В. Асадчая // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 69–79. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79

14. Стрижак, В.А. Стенд для определения зависимости скорости стержневой волны от температуры в металлических прутках / В.А. Стрижак // Контроль. Диагностика. – 2023. – Т. 26, № 3(297). – С. 40–49. **DOI:** 10.14489/td.2023.03.pp.040-049

15. Стрижак, В.А. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В.А. Стрижак, А.В. Пряхин, Р.Р. Хасанов, А.Б. Ефремов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 565–571.
DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571

16. Буденков, Г.А. Новая прогрессивная технология дефектоскопии протяженных объектов металлургической и нефтедобывающей промышленности / Г.А. Буденков, О.В. Муравьева, Т.Н. Лебедева // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 11. – С. 28–30.

17. Муравьев, В.В. Структуроскопия витков пружин после высокотемпературной механической обработки на основе измерения скорости рэлеевских волн / В.В. Муравьев, Л.В. Гущина // Приборы и методы измерений. – 2022. – Т. 13, № 2. – С. 147–154. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-2-147-154

18. Муравьев, В.В. Реализация импульсного метода определения скорости ультразвука с высокой точностью / В.В. Муравьев [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2021. – Т. 19, № 2. – С. 13–19. **DOI:** 10.22213/2410-9304-2021-2-13-19

19. Muraveva, O.V. Comparative Sensitivity of Informative Parameters of Electromagnetic-Acoustic Mirror-Shadow Multiple Reflections Method during Bar Stock Testing / O.V. Muraveva, A.F. Brester, V.V. Muravev // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58, No. 8. – P. 689–704. **DOI:** 10.1134/S1061830922080083

20. Detecting Flaws in Pumping-Compressor Pipe Couplings by Magnetic, Eddy Current, and Ultrasonic Multiple-Shadow Testing Methods / O.V. Muraveva, V.V. Muraviev, M.A. Sintsov, L.V. Volkova // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58, No. 4. – P. 248–258. **DOI:** 10.1134/S1061830922040088

21. Murav'eva, O.V. The acoustic path in the method of multiple reflections during nondestructive testing of linearly extended objects / O.V. Murav'eva, D.V. Zlobin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2013. – Vol. 49, No. 2. – P. 93–99. **DOI:** 10.1134/S1061830913020058

22. Muraveva, O.V. Analysis of reflected signals in testing cylindrical specimens by the multiple reflection echo-shadow method / O.V. Murav'eva [et al.] // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2016. – Vol. 52, No. 4. – P. 367–373. **DOI:** 10.3103/S8756699016040087

23. Муравьев, В.В. Особенности программного обеспечения аппаратного комплекса для акустической тензометрии и структуроскопии металлоизделий / В.В. Муравьев, В.А. Стрижак, Р.Р. Хасанов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 2(29). – С. 71–75.

24. Strizhak, V.A. Acoustic Testing of Composite Rebars Taking into Account Reinforcement Ratio / V.A. Strizhak // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58, No. 10. – P. 891– 902. **DOI:** 10.1134/S1061830922600836

25. Zaitsev, B.D. Determination of the Acoustic Wave Velocity and Attenuation in Liquids with Different Acoustic Impedances Using an Acoustic Interferometer / B.D. Zaitsev, I.A. Borodina, A.A. Teplykh, A.P. Semyonov // Acoustical Physics. – 2023. – Vol. 69, No. 4. – P. 503–509. **DOI:** 10.1134/s1063771023600493

26. Zverev, V.A. Measurement of the parameters of a pulse propagation path in a medium with noise, dispersion, and selective absorption / V.A. Zverev, N.E. Nikitina // Acoustical Physics. – 2006. – Vol. 52, No. 4. – P. 408–412. **DOI:** 10.1134/S1063771006040051

27. Suchkov G.M. Noncontact Spectral Express Method for Detecting Corrosion Damage to Metal Products / G.M. Suchkov [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – Vol. 56, No. 1. – P. 12–19. **DOI:** 10.1134/S1061830920010118

28. Мурашов, В.В. Контроль изделий из ПКМ и многослойных клееных конструкций ультразвуковыми методами отражения / В.В. Мурашов, А.С. Генералов // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 1(46). – С. 69–74. **DOI:** 10.18577/2071-9140-2017-0-1-69-74

29. Способ измерения локальных напряжений в металлоконструкциях горных машин / А.В. Серебренников, И.И. Демченко, В.Л. Серебренников, Е.А. Левченко // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 6. – С. 42–46.

30. Murav'eva, O.V. Torsional waves excited by electromagnetic–acoustic transducers during guided-wave acoustic inspection of pipelines / O.V. Murav'eva, S.A. Murashov, S.V. Len'kov // Acoustical Physics. – 2016. – Vol. 62, No. 1. – P. 117–124. **DOI:** 10.1134/S1063771015060093

31. Муравьева, О.В. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов / О.В. Муравьева [и др.] // Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2017. – 234 с.

32. Yung T.Ch. Ultrasonic guided wave testing on pipeline corrosion detection using torsional T(0,1) guided waves / T.Ch. Yung [et al.] // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. – 2022. – P. 9157–9166. **DOI:** 10.15282/jmes.16.4.2022.01.0725

33. Хомутов, А.С. Выявление дефектов цилиндра глубинно-штангового насоса после ионного азотирования / А.С. Хомутов, В.В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 16–26. **DOI:** 10.22213/2410-9304-2023-2-16-26

34. Оценка чувствительности к дефектам и исследование скоростей волн в трубах-заготовках цилиндров глубинного штангового насоса волноводным акустическим методом / В.А. Стрижак,

Р.Р. Хасанов, А.С. Хомутов [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 86–100.
DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100

35. Vinogradov S. Applications of Linear Scanning Magnetostrictive Transducers (MST) for Finding Hard-to-Detect Anomalies in Structural Components / S. Vinogradov, X. Chen, A. Cobb, Ja. Fisher // Research and Review Journal of Nondestructive Testing. – 2023. – Vol. 1, No. 1.
DOI: 10.58286/28141

36. Vinogradov S, Cobb A, Fisher J. New Magnetostrictive Transducer Designs for Emerging Application Areas of NDE. Materials. 2018;11(5):755.
DOI: 10.3390/ma11050755

Acknowledgments

Completed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FZZN-2025-0003 (numerical modeling), and the Program for the Development of scientific and scientific-pedagogical personnel of M.T. Kalashnikov IzhSTU 2025 EMC-2025 (experimental research).

References

1. Klyuyev VV. [et al.]. Non-destructive testing. Moscow: Mashinostroenie Publ. 2004;6:832.

2. Baev AR. [et al.]. Influence of Geometry and Boundary Conditions in Area of the Cohesion between Materials on the Reflection of an Ultrasonic Beam. Part 2. Features of Experimental Simulation. Devices and Methods of Measurements. 2021;12(4):301-310.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-4-301-310

3. Baev AR. [et al.]. Possibilities of Using of Surface and Subsurface Waves' Amplitude-Angle Characteristics for Control of Materials with Surface-Hardened Inhomogeneous Layer. Devices and Methods of Measurements. 2022;13(4):263-275.
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-263-275

4. Diogo AR, Moreira B, Gouveia CAJ, Tavares JMRS. A Review of Signal Processing Techniques for Ultrasonic Guided Wave Testing. Metals. 2022;12(6):936.
DOI: 10.3390/met12060936

5. Strizhak VA, Pryakhin AV, Khasanov RR, Mkrtchyan SS. Flaw Detection of Composite Rebar by Acoustic Wave Guided Technique. 2019;22(1):78-88. (In Russ.).
DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-78-88

6. Zang X. [et al.]. Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection: A review. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2023;206:105033.
DOI: 10.1016/j.ijpvp.2023.105033

7. Muravyeva OV, Shikharev PA, Murashov SA. Propagation of guided acoustic waves in the shafts of centrifugal pumps with longitudinal cracks of axial holes. Testing. Diagnostics. 2024;27(307):14-29. (In Russ.).
DOI: 10.14489/td.2024.01.pp.014-029

8. Baev AR. [et al.]. Peculiarities of Optoacoustic Excitation and Propagation of Plate Waves in Thin-Walled Objects. Devices and Methods of Measurements. 2023;14(4):233-241.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-233-241

9. Murav'ev VV, Murav'eva OV, Vagapov TR, Makarova VE, Stepanova EA. Acoustic and electromagnetic properties of civilian gun blanks. 2023;21(1):59-70. (In Russ.). **DOI:** 10.22213/2410-9304-2023-1-59-70

10. Muravyov VV, Budrin AYU, Sintsov MA. Structuroscopy of heat-treated steel bars by the speed of propagation of rayleigh waves. 2020;18(2):37-43. (In Russ.).
DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43

11. Muravyeva OV [et al.]. Thermal Treatment Effect and Structural State of Rod-Shaped Assortment 40Kh Steel on the Speed of Ultrasound Waves and Poisson Coefficient. Steel in Translation. 2020;50(8):579-584.
DOI: 10.3103/S0967091220080082

12. Muravyeva OV [et al.]. Acoustic properties of XM-5 ph maraging steel after energy deposition. Frontier Materials & Technologies. 2024;(2):87-100. (In Russ.)
DOI: 10.18323/2782-4039-2024-2-68-8

13. Baev AR, Mayorov AL, Levkovich NV, Asadchaya MV. Features of the Surface and Subsurface Waves Application for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids. Part 2. Strenghtned Inhomogeneous Surface Layer. Devices and Methods of Measurements. 2019;10(1):69-79. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79

14. Strizhak VA. Stand for determining the dependence of the rod wave velocity on the temperature in metal bars. Testing. Diagnostics. 2023;26;3(297):40-49. (In Russ.)
DOI: 10.14489/td.2023.03.pp.040-049

15. Strizhak VA, Pryakhin AV, Khasanov RR, Efremov AB. Hardware-software complex for rods control by mirror-shadow method using multiple reflec tions. 2017;(6):565-571. (In Russ.).
DOI: 10.17586/0021-3454 2017-60-6-565-571

16. Budenkov GA, Muraveva OV, Lebedeva TN. Technology for defect detection in equipment in metal and petroleum-producing industries. Tyazh. Mashinostr. 2004;(11):28-30. (In Russ.).

17. Murav'ev VV, Gushchina LV. Structuroscopy of Coils after High-Temperature Mechanical Treatment on the Basis of Measurements of Rayleigh Waves Velocity.

Devices and Methods of Measurements. 2022;13(2):147-154. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-2-147-154

18. Murav'ev VV [et al.]. Implementation of a pulse method for determining ultrasound velocity with high accuracy. 2021;19(2):13-19. (In Russ.).
DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-13-19

19. Muraveva OV, Brester AF, Muravev VV. Comparative Sensitivity of Informative Parameters of Electromagnetic-Acoustic Mirror-Shadow Multiple Reflections Method during Bar Stock Testing. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022;58(8):689-704.
DOI: 10.1134/S1061830922080083

20. Muraveva OV. [et al.]. Detecting Flaws in Pumping-Compressor Pipe Couplings by Magnetic, Eddy Current, and Ultrasonic Multiple-Shadow Testing Methods. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022;58(4):248-258.
DOI: 10.1134/S1061830922040088

21. Muraveva OV, Zlobin DV. The acoustic path in the method of multiple reflections during nondestructive testing of linearly extended objects. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013;49(2):93-99.
DOI: 10.1134/S1061830913020058

22. Murav'ev VV [et al.]. Analysis of reflected signals in testing cylindrical specimens by the multiple reflection echo-shadow method. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2016;52(4):367-373.
DOI: 10.3103/S8756699016040087

23. Muraviev VV, Strizhak VA, Khasanov RR. Features of the software for the hardware-based system of acoustic tensometry and structural inspection of metal products. 2016;(2):71-75. (In Russ.).

24. Strizhak VA. Acoustic Testing of Composite Rebars Taking into Account Reinforcement Ratio. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022;58(10):891-902.
DOI: 10.1134/S1061830922600836

25. Zaitsev BD, Borodina IA, Teplykh AA, Semyonov AP. Determination of the Acoustic Wave Velocity and Attenuation in Liquids with Different Acoustic Impedances Using an Acoustic Interferometer. Acoustical Physics. 2023;69(4):503-509.
DOI: 10.1134/s1063771023600493

26. Zverev VA, Nikitina NE. Measurement of the parameters of a pulse propagation path in a medium with noise, dispersion, and selective absorption. Acoustical Physics. 2006;52(4):408-412.
DOI: 10.1134/S1063771006040051

27. Suchkov GM. [et al.]. Noncontact Spectral Express Method for Detecting Corrosion Damage to Metal Products. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020;56(1):12-19.
DOI: 10.1134/S1061830920010118

28. Murashov VV, Generalov AS. PCM products and multilayer glued structures testing by ultrasonic reflection methods. Aviation materials and technologies. 2017;1(46):69-74. (In Russ.).
DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-69-74

29. Serebrennikov VL. Way of measurement of local tensions in the steel structures of mining machines. Occupational safety in industry. 2016;(6):42-46. (In Russ.).

30. Murav'eva OV, Murashov SA, Len'kov SV. Torsional waves excited by electromagnetic–acoustic transducers during guided-wave acoustic inspection of pipelines. Acoustical Physics. 2016;62(1):117-124.
DOI: 10.1134/S1063771015060093

31. Murav'eva OV, Murav'ev VV, Strizhak VA. Acoustic waveguide con trol of linearly extended objects. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2017;234 p. (In Russ.).

32. Yung TCh. [et al.]. Ultrasonic guided wave testing on pipeline corrosion detection using torsional T(0,1) guided waves. Journal of Mechanical Engineering and Sciences. 2022;9157-9166.
DOI: 10.15282/jmes.16.4.2022.01.0725

33. Khomutov AS, Muraviev VV. Flaw detection in the deep-rod pump cylinder after ion nitriding. 2023;21(2):16-26. (In Russ.).
DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-16-26.

34. Strizhak VA [et al.]. Waveguide acoustic control of pipes – billets of deep rod pumps. Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2024;27(3):86-100. (In Russ.).
DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100

35. Vinogradov S. Applications of Linear Scanning Magnetostrictive Transducers (MST) for Finding Hard-to-Detect Anomalies in Structural Components. Research and Review Journal of Nondestructive Testing. 2023;1(1).
DOI: 10.58286/28141

36. Vinogradov S, Cobb A, Fisher J. New Magnetostrictive Transducer Designs for Emerging Application Areas of NDE. Materials. 2018;11(5):755.
DOI: 10.3390/ma11050755