

## ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА СЕЧЕНИЯ СТЕНКИ ТРУБЫ МАЛОГО ДИАМЕТРА УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

© 2025 г. О.В. Муравьева<sup>1,2,\*</sup>, К.Ю. Белослудцев<sup>1</sup>, А.Л. Владыкин<sup>1</sup>, Е.А. Степанова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова,  
Россия 426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7

<sup>2</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,  
Россия 426067 Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34  
E-mail: \*pmkk@istu.ru

Поступила в редакцию 08.07.2025; после доработки 18.07.2025

Принята к публикации 18.07.2025

Отклонение от номинальных значений толщины стенки трубы как на этапе их изготовления, так и в процессе эксплуатации — критический фактор, влияющий на долговечность оборудования. В работе предложена модель процесса распространения акустической волны по сечению трубы с эксцентриситетом, на основании которой теоретически обоснована методика интегральной оценки неравномерности толщины стенки труб малого диаметра. Методика реализована с использованием специализированного гибкого пьезопреобразователя на основе поливинилдифторида на нескольких образцах бесшовных труб различной толщины и подтверждена результатами локальной ультразвуковой толщинометрии.

**Ключевые слова:** акустический метод, эксцентриситет сечения трубы, интегральная толщинометрия, локальная толщинометрия, моделирование.

## INTEGRAL ASSESSMENT OF WALL THICKNESS ECCENTRICITY IN SMALL-DIAMETER PIPES USING AN ULTRASONIC METHOD

© 2025 O.V. Muravieva<sup>1,2,\*</sup>, K.Yu. Belosludtsev<sup>1</sup>, A.L. Vladykin<sup>1</sup>, E.A. Stepanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
Russia 426069 Izhevsk, Studencheskaya str., 7

<sup>2</sup>Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Russia, Udmurt Republic, 426067 Izhevsk, Tatiana Baramzina str., 34  
E-mail: \*pmkk@istu.ru

Deviation from the nominal wall thickness of a pipe—both during manufacturing and in operation—is a critical factor affecting the durability of equipment. This study proposes a model of acoustic wave propagation across a pipe cross-section with eccentricity, which forms the theoretical basis for a method of integral assessment of wall thickness non-uniformity in small-diameter pipes. The method is implemented using a specialized flexible piezoelectric transducer based on polyvinylidene fluoride (PVDF) on several samples of seamless pipes with varying thicknesses, and is validated by the results of local ultrasonic thickness measurements.

**Keywords:** acoustic method, pipe cross-section eccentricity, integral thickness measurement, local thickness measurement, modeling.

DOI: 10.31857/S0130308225080038

### ВВЕДЕНИЕ

Бесшовные стальные трубы малого диаметра широко используются для производства деталей нефтедобывающего оборудования, в частности цилиндров и плунжеров штанговых глубинных насосов (ШГН). Цилиндры и плунжеры ШГН являются ключевыми элементами, к качеству и геометрии которых предъявляются строгие технические требования (ГОСТ 31835—2012) [1]. Отклонение от номинальных значений толщины стенки трубы как на этапе их изготовления, так и в процессе эксплуатации — критический фактор, влияющий на долговечность оборудования. Так эксцентриситет сечения стенки трубы может оказывать существенное влияние на производительность насосов, определяемых объемом перекачиваемой жидкости за один цикл.

Технологический процесс производства бесшовных труб, как правило, включает горячую прокатку трубной заготовки, состоящую из операций прошивки, раскатки, редуцирования или калибрования, а также отделки поверхности. На заключительных стадиях применяют холодную деформацию, позволяющую получить трубы с требуемой геометрической точностью и механическими характеристиками [2, 3]. Дополнительно трубы для цилиндров ШГН подвергаются механической доводке — правке, расточке, хонингованию [4]. Процесс горячей прокатки оста-

ется ключевым источником геометрических отклонений, в частности неравномерности толщины стенки, которая формируется как в поперечном, так и в продольном направлениях [5]. Неоднородность может проявляться в виде спиралевидных утонений, линейных зон с отклонениями, а также локальных утолщений и утонений на головной и хвостовой частях трубы. Причинами являются отклонения осевой соосности оборудования, нарушение симметрии прокатки, вибрации выталкивающих узлов, преждевременное открытие центрирующих роликов и колебания температурного режима. Все эти факторы в совокупности нарушают равномерность деформации металла, создавая асимметрию распределения толщины по длине и периметру трубы. Это, в свою очередь, снижает механическую стабильность изделия, вызывает локальную концентрацию напряжений, ускоряет износ в местах с минимальной толщиной и приводит к снижению общего ресурса цилиндров [6, 7].

Нормирование отклонений по разностенности и толщине стенки бесшовных труб регламентирует ряд российских нормативных документов (ГОСТ Р 53366, ГОСТ 10704) и китайских стандартов GB 13296-2007, где, в частности, указано, что неравномерность не должна превышать 80 % от допуска на толщину. Стандарт ASTM A1016/A1016M (США) устанавливает пределы неравномерности толщины стенки трубы как разность между максимальной и минимальной толщиной стенки на одном сечении, которая не должна превышать для бесшовных труб  $\pm 10$  % от их среднего значения.

Контроль внутреннего диаметра цилиндра может быть осуществлен пневматическим методом, например, с использованием установки контроля геометрических параметров цилиндров ШГН «Аэротест» «Цилиндр ШГН-Р» [8].

Современные подходы к контролю толщины стенки труб при производстве предполагают использование лазерных и оптических измерительных систем, обеспечивающих высокоточное и непрерывное сканирование трубной поверхности [9—14]. Эти технологии позволяют в реальном времени отслеживать геометрию изделия и строить профиль толщины по всей длине. За счет бесконтактного принципа действия и высокой скорости измерений данные системы широко применяются в автоматизированных производственных линиях. Однако, несмотря на высокую точность, данные методы обладают рядом ограничений — снижение достоверности показаний при наличии загрязнений, влаги, окалина и следов смазки. Кроме того, на точность измерений влияют отражающие свойства металла, что требует регулярной калибровки оборудования. В случае нестабильной геометрии трубы возможны искажения, вызванные колебаниями сигнала, особенно при высокой овальности или кривизне заготовки.

Среди методов неразрушающего контроля (НК) для задач толщинометрии труб, в том числе утонений вследствие коррозионных повреждений, широкое применение получили электромагнитные методы [15—17], методы термографии [18], комбинированные методы теплового и электромагнитного контроля [19], бесконтактные лазерно-ультразвуковые методы [20—23], методы рентгеновской толщинометрии [24].

К традиционным методам толщинометрии относят ультразвуковой эхо-импульсный метод [25], в том числе с использованием электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей [26, 27], а также преобразователей с сухим точечным контактом [28].

В литературе представлены подходы к измерению толщины стенки резонансным методом по анализу параметров окружных резонансных колебаний участков трубы [29].

При анализе протяженных коррозионных повреждений трубопроводов применяют дистанционные волноводные методики контроля, основанные на использовании направленных нормальных волн мод  $L(0,1)$  и  $L(0,2)$  [30—33], а также SH-волн [34, 35].

Следует отметить, что традиционные эхо-импульсные методы контактной ультразвуковой толщинометрии при оценке неравномерности толщины стенки трубы требуют сканирования поверхности трубы при ее поступательно-вращательном перемещении, при этом снижается производительность и достоверность контроля вследствие сложности обеспечения надежного акустического контакта преобразователя с поверхностью трубы малого диаметра.

Цель работы — разработка модели процесса распространения волны по сечению трубы с неравномерной толщиной стенки, теоретическое обоснование и разработка методики экспериментальной интегральной оценки эксцентриситета сечения стенки трубы малого диаметра с использованием специализированного гибкого пьезопреобразователя на основе поливинилidenфторида, размещаемого по периметру трубы.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ

Постановка задачи распространения продольной волны по сечению трубы с равномерной и неравномерной толщинами стенки трубы представлена на рис. 1а. Рассматривается труба с наружным радиусом  $R$ , внутренним радиусом  $r$ , номинальной толщиной стенки  $h$ . Под нерав-

номерностью толщины стенки трубы будем понимать отклонение по форме поперечного сечения трубы в виде эксцентриситета или дефекта сечения типа «кольцо», представляющее собой смещение центров внутреннего и наружного диаметров на величину эксцентриситета  $e$  (рис. 1б).

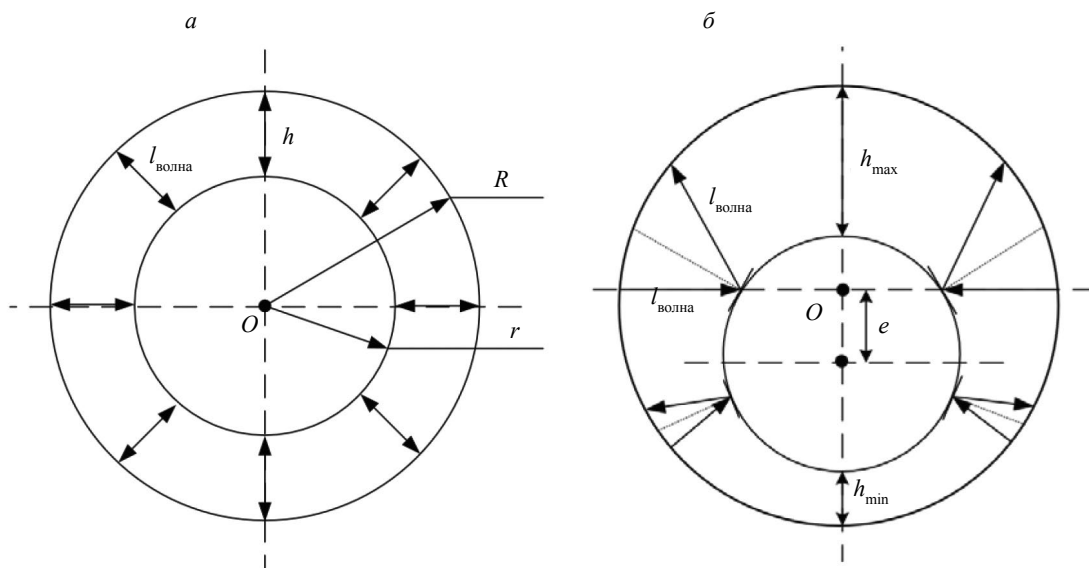


Рис. 1. Распространение продольной волны по сечению трубы с равномерной (а) и неравномерной (б) толщинами стенки.

Полагаем, что возбуждение акустической волны происходит в каждой точке (элементарном излучателе)  $I_i$  наружной поверхности трубы с помощью преобразователя, огибающего по периметру ее поверхность (рис. 2). Многократно переотраженная от внутренней и наружной стенок трубы акустическая волна принимается элементарным приемником  $\Pi_i$  и далее интегрируется по всей поверхности преобразователя.

Временная форма импульса на каждом  $k$ -м отражении  $U_{\Sigma k}(t)$  может быть получена как результат суммирования во времени импульсов, прошедших расстояние  $2h_i$  от элементарного излучателя со скоростью продольной волны  $C_l$ :

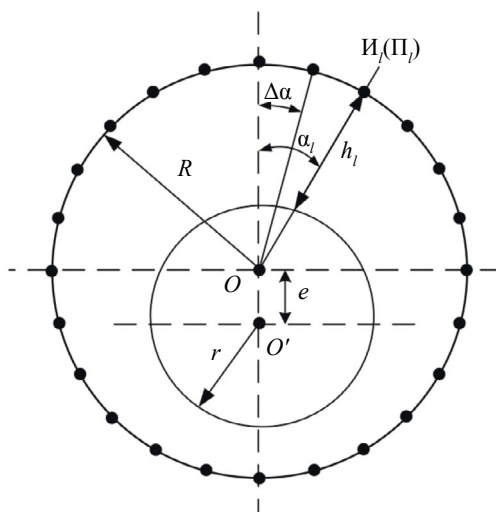


Рис. 2. Модель процесса распространения акустической волны по сечению трубы с неравномерной толщиной стенки.

$$U_{\Sigma^k}(t) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L U \left( t - \frac{2kh_l}{C_l} \right), \quad (1)$$

где  $L$  — число элементарных излучателей (приемников), равномерно распределенных по периметру трубы, определяемое выражением  $L = 2\pi R/\Delta\alpha$ ;  $\Delta\alpha$  — шаг суммирования, определяемый угловым расстоянием между элементарными излучателями (приемниками);  $k$  — номер отражения.

Результирующая серия импульсов во временной области  $U_{\Sigma}(t)$  может быть получена как результат суммирования импульса на каждом  $k$ -м отражении  $U_{\Sigma^k}(t)$  по  $K$  отражениям:

$$U_{\Sigma}(t) = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L U \left( t - \frac{2kh_l}{C_l} \right), \quad (2)$$

где  $K$  — количество анализируемых отражений

Исходя из геометрических соображений (см. рис. 1), расстояние  $h_l$ , соответствующее толщине стенки трубы в точке  $I_l(P_l)$ , определяемой углом  $\alpha_l$ , описывается выражением:

$$h_l = r \frac{\cos \left[ \arcsin \left( \frac{e}{r} \cos \alpha_l \right) + \alpha_l \right]}{\cos \alpha_l}, \quad (3)$$

где  $r$  — радиус внутренней окружности;  $e$  — величина эксцентриситета.

В качестве аппроксимации начального (зондирующего) импульса используется затухающее колебание, описываемое выражением:

$$U(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi ft) \cdot e^{-\beta t}, \quad (4)$$

где  $\beta$  — коэффициент затухания, пропорциональный частоте  $f$ , 1/с;  $U_0$  — амплитуда зондирующего импульса.

При моделировании использованы следующие параметры: частота  $f = 10$  МГц, коэффициент затухания в импульсе  $\beta = 15 \cdot 10^6$  1/мкс; наружный радиус трубы  $R = 27$  мм — внутренний радиус трубы  $r = 22$  мм, скорость продольной волны  $C_l = 5950$  м/с; количество элементарных излучателей (приемников)  $L = 360$  (шаг по углу 1 град); количество анализируемых отражений  $K = 10$ .

При моделировании не учтены потери, обусловленные затуханием и расхождением волн, а также фазовыми сдвигами при отражении от свободных поверхностей.

Результатом моделирования в программном обеспечении Mathcad 14 является серия импульсов многократных отражений по толщине стенки трубы. В случае равномерной толщины стенки трубы  $h$  наблюдается серия импульсов, повторяющих по форме зондирующий импульс, с периодом  $t$ , определяемым скоростью продольной волны  $C_l$  и номинальной толщиной стенки трубы (рис. 3а):

$$t = \frac{2h}{C_l}. \quad (5)$$

В случае неравномерной толщины стенки трубы серия переотраженных импульсов имеет вид, представленный на рис. 3б. Наблюдается разфазировка (запаздывание) импульсов, переотраженных по толщине неравномерной стенки, при этом определяющий вклад в амплитуды разфазированных отраженных сигналов вносят области прозвучивания с максимальной  $h_{\max}$  и минимальной  $h_{\min}$  толщинами стенки, где наблюдается направленное отражение в обратном направлении (см. рис. 1б). Время запаздывания импульсов  $\Delta t$  растет с увеличением номера отражения  $k$  и определяется разницей минимальной и максимальной толщин или эксцентриситетом  $e = h_{\max} - h_{\min}$ , а также скоростью продольной волны и номером отражения:

$$\Delta t = t_{\max} - t_{\min} = \frac{2(h_{\max} - h_{\min})}{C_l} = \frac{2e}{C_l}. \quad (6)$$

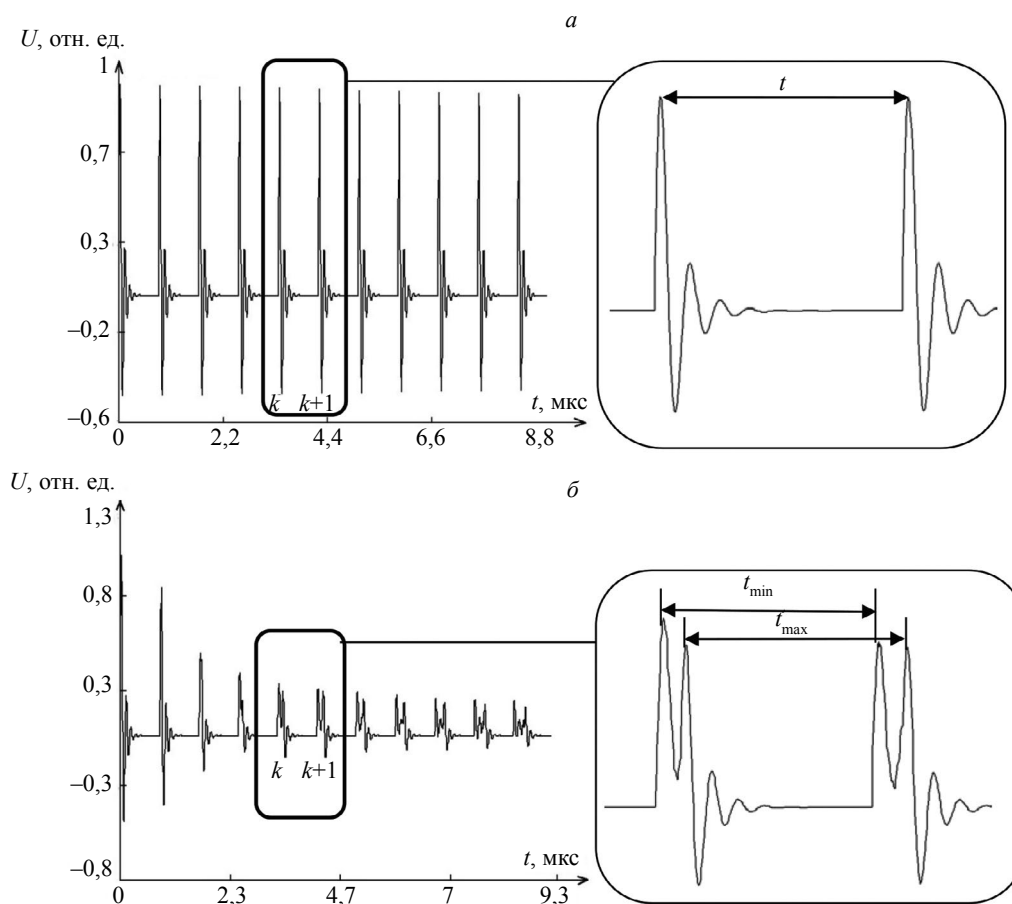


Рис. 3. Осциллограммы серии многократных отражений для труб с равномерной толщиной стенки (а) и с неравномерной толщиной стенки с эксцентриситетом  $e = 0,08$  мм (б).

где  $C_l$  — скорость продольной волны в материале;  $t_{\max}$  — разница времени между  $k$ -м и  $(k+1)$ -м импульсами для участка с максимальной толщиной стенки трубы  $h_{\max}$ ;  $t_{\min}$  — разница времени между  $k$ -м и  $(k+1)$ -м импульсами для участка с минимальной толщиной стенки трубы  $h_{\min}$ .

На рис. 4 представлены результаты моделирования в виде зависимости времени запаздывания импульсов  $\Delta t$  от неравномерности толщины стенки трубы (эксцентриситета  $e$ ). Наблюдается однозначная линейная прямопропорциональная зависимость, которая выражается уравнением регрессии:

$$\Delta t = G \cdot e, \quad (7)$$

где  $G = 0,354$  мкс/мм — коэффициент пропорциональности между временем  $\Delta t$ , мкс и эксцентриситетом  $e$ , мм.

Полученная зависимость является универсальной для любых диаметров труб и любой номинальной толщины стенки.

Следует отметить, что увеличение длительности импульса, обусловленное увеличением его добротности (уменьшением коэффициента затухания) или снижением рабочей частоты, ведет к ограничению чувствительности методики к минимальной обнаруживаемой неравномерности по толщине стенки, что обусловлено невозможностью раздельного разрешения импульсов даже на дальних отражениях. В табл. 1 представлены минимальные значения эксцентриситета, уверенно обнаруживаемые при различных параметрах возбуждения при анализе количества отражений  $K$ , равном 10. Увеличение количества отражений  $K$  позволяет улучшить разрешение импульсов, соответствующих минимальной и максимальной толщине стенки трубы, однако реальное ослабление, вызванное затуханием и расхождением акустической волны в процессе ее распространения, ограничивают число регистрируемых отражений. Прочерки в таблице говорят о невозможности оценить эксцентриситет при количестве отражений  $K = 10$  на данной частоте и при данной добротности.

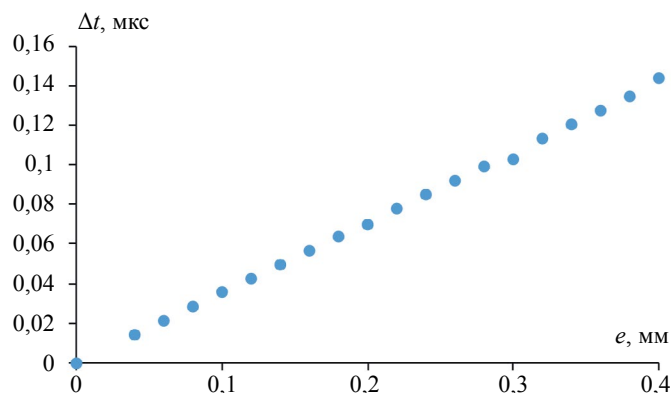


Рис. 4. График зависимости времени запаздывания импульсов от неравномерности толщины стенки трубы (эксцентриситета  $e$ ).

Таблица 1

Минимальные значения эксцентриситета  $e$  при различных параметрах возбуждения, мм

| $\beta$ , 1/мкс       | $e_{\min}$ , мм |
|-----------------------|-----------------|
| Частота $f = 2,5$ МГц |                 |
| 6,2                   | 0,10            |
| 3,8                   | —               |
| 2,3                   | —               |
| Частота $f = 5$ МГц   |                 |
| 11                    | 0,06            |
| 6                     | 0,08            |
| 3,5                   | —               |
| Частота $f = 10$ МГц  |                 |
| 16                    | 0,03            |
| 9                     | 0,05            |
| 5                     | 0,07            |

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальное подтверждение методики оценки неравномерности толщины стенки трубы проведено на трех образцах труб цилиндров глубинно-штангового насоса 08312-НН после операции ионного азотирования внутренней поверхности. Образцы изготовлены из стали 38Х2МЮА и имеют геометрические параметры, представленные в табл. 2. Часть образцов была забракована по недопустимому отклонению внутреннего диаметра с дефектами типа «кольцо» с использованием контрольно-измерительного комплекса «Аэротест-ШГН» [8].

Таблица 2

Геометрические параметры исследованных образцов труб

| № образца | Внешний диаметр, мм | Внутренний диаметр, мм | Номинальная толщина стенки, мм | Длина, мм | Тип дефекта по Аэротест-ШГН |
|-----------|---------------------|------------------------|--------------------------------|-----------|-----------------------------|
| 1         | 54                  | 44,45                  | 4,5                            | 316       | «Кольцо»                    |
| 2         | 57,5                | 44,45                  | 6,5                            | 294       | Без дефекта                 |
| 3         | 41                  | 31,75                  | 4,5                            | 304       | «Кольцо»                    |

При измерениях в качестве акустического преобразователя использована гибкая пьезопленка на основе поливинилиденфторида (ПВДФ) толщиной 110 мкм, длиной, соответствующей периметру трубы (рис. 5а). Формирование пьезопленки ПВДФ по огибающей трубы осу-

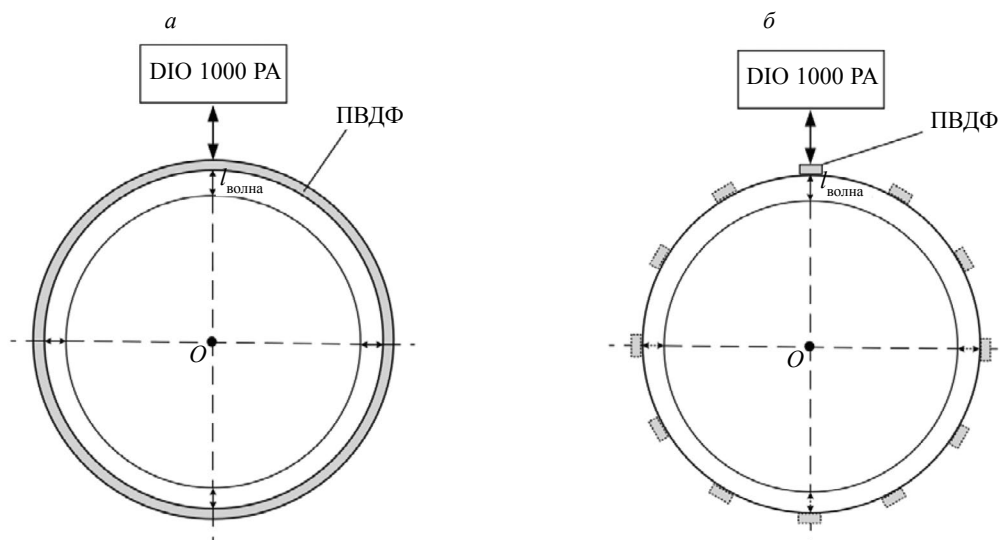


Рис. 5. Схемы методов интегральной оценки неравномерности толщины стенки трубы (а) локальной ультразвуковой толщинометрии (б).

ществляется за счет ее наклеивания на протектор с клеевым слоем из полиуритановой пленки типа Ultra Flex толщиной 100 мкм, повторяющий геометрию трубы. Размещаемая по периметру трубы пьезопленка ПВДФ излучает (принимает) через слой контактной жидкости продольную волну по всем диаметральному направлениям трубы за счет продольного пьезоэффекта по толщине пьезопленки [36]. Рабочая частота пьезопреобразователя на основе ПВДФ составляет 10 МГц. Сканирование образцов интегральным методом производилось с шагом 10 мм по образующей трубы. При исследованиях использовался дефектоскоп DIO1000-PA (рис. 6) с возможностью сохранения сигнала во временной области с частотой дискретизации 200 МГц. При этом точность определения времени прихода составляет 5 нс. Настройки, используемые для измерений, приведены в табл. 3.

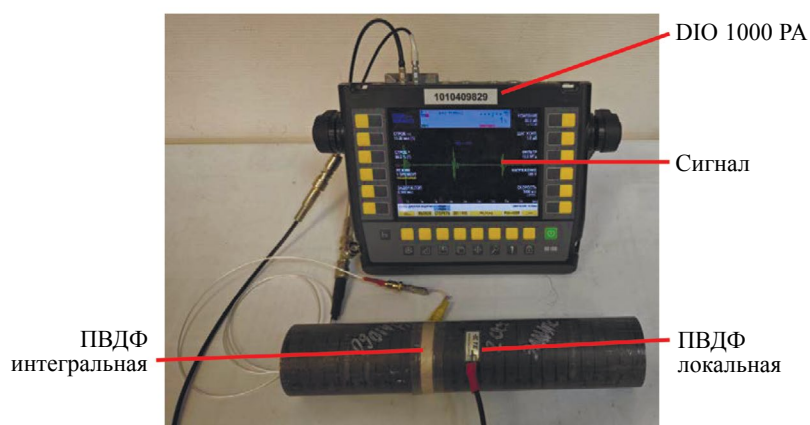


Рис. 6. Фото экспериментальной установки с установленными на поверхность трубы интегральным и локальным ультразвуковыми преобразователями на основе ПВДФ.

С целью верификации методики интегральной оценки неравномерности толщины дополнительно с использованием локального метода УЗ толщинометрии проведены измерения толщины стенки трубы в зонах по периметру трубы с шагом  $30^\circ$  и по длине трубы с шагом 10 мм. Использовалась пьезопленка ПВДФ размерами  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup> (рис. 5б).

Настройки дефектоскопа DIO 1000 PA

| Вид характеристики        | Амплитудный, ед.                                       |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|
| Скорость                  | 5900 м/с                                               |
| Ширина полосы пропускания | 3,5...200 МГц                                          |
| Фильтр                    | 10 МГц                                                 |
| Усиление                  | От 75 до 90 дБ                                         |
| Режим                     | 1 элемент расширенный, Игла, выпрямление 2-полупериода |
| Диапазон                  | 10,24 мкс                                              |
| Усреднение                | 64                                                     |
| Частота ПЭП               | 10 МГц                                                 |
| Импеданс                  | 42 Ом                                                  |
| Напряжение                | 189 В                                                  |
| Частота дискретизации АЦП | 200 МГц                                                |

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера на рис. 7а приведены серии импульсов многократных отражений по толщине стенки образца трубы № 1 в результате интегрального прозвучивания образца с равномерной и неравномерной толщинам стенки. В отличие от равномерной, для неравномерной толщины стенки наблюдается запаздывание импульсов по времени, увеличивающееся по мере увеличения количества отражений. Расчитав при прозвучивании данного сечения трубы значение  $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$  и зная скорость продольной волны в материале трубы, можно, исходя из формулы (6), определить эксцентриситет, соответствующий этому сечению:

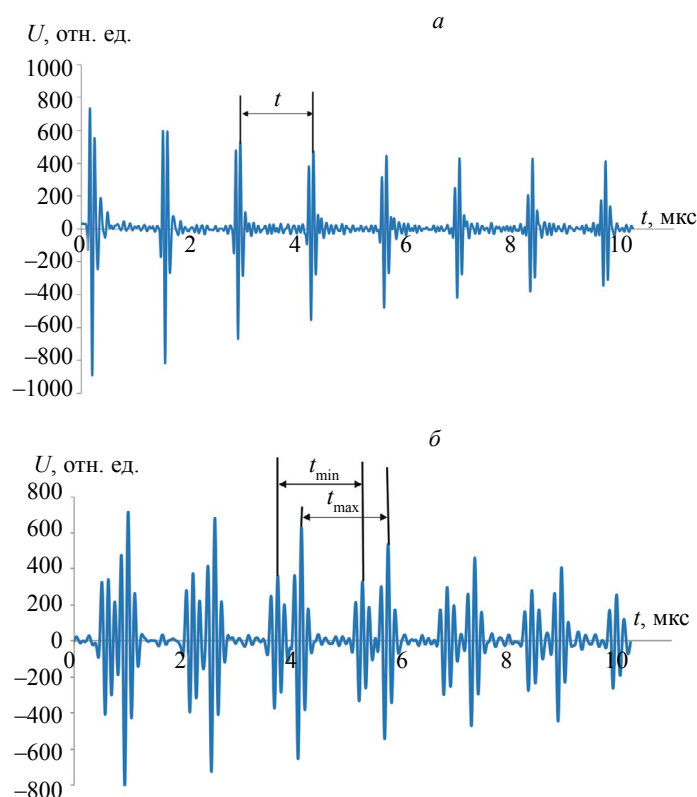


Рис. 7. Примеры экспериментальных осциллограмм серии многократных переотражений при равномерной (а) и неравномерной (б) толщинах стенки трубы.

$$e = \frac{\Delta t \cdot C_l}{2}. \quad (8)$$

Результаты оценки неравномерности толщины стенки (эксцентриситета) по сечениям трех образцов цилиндров глубинно-штанговых насосов представлены на рис. 7. По длине образцов наблюдается различная неравномерность. Для образца № 3 с дефектом типа «кольцо» с номинальной толщиной стенки 4,5 мм и внешним диаметром 41 мм наблюдается максимальное отклонение по толщине стенки трубы: максимальный эксцентриситет составляет 0,26 мм, минимальный — 0,12 мм. Для образца № 2 с номинальной толщиной стенки 6,5 мм и внешним диаметром 57,5 мм, в котором по результатам анализа на Аэротест-ШГН не обнаружен дефект внутреннего сечения, максимальный эксцентриситет не превышает 0,1 мм, минимальный — 0,02 мм. Для образца № 1 с номинальной толщиной стенки 4,5 мм, внешним диаметром 54 мм и дефектом типа «кольцо» максимальный эксцентриситет не превышает 0,16 мм, минимальный — 0,04 мм.

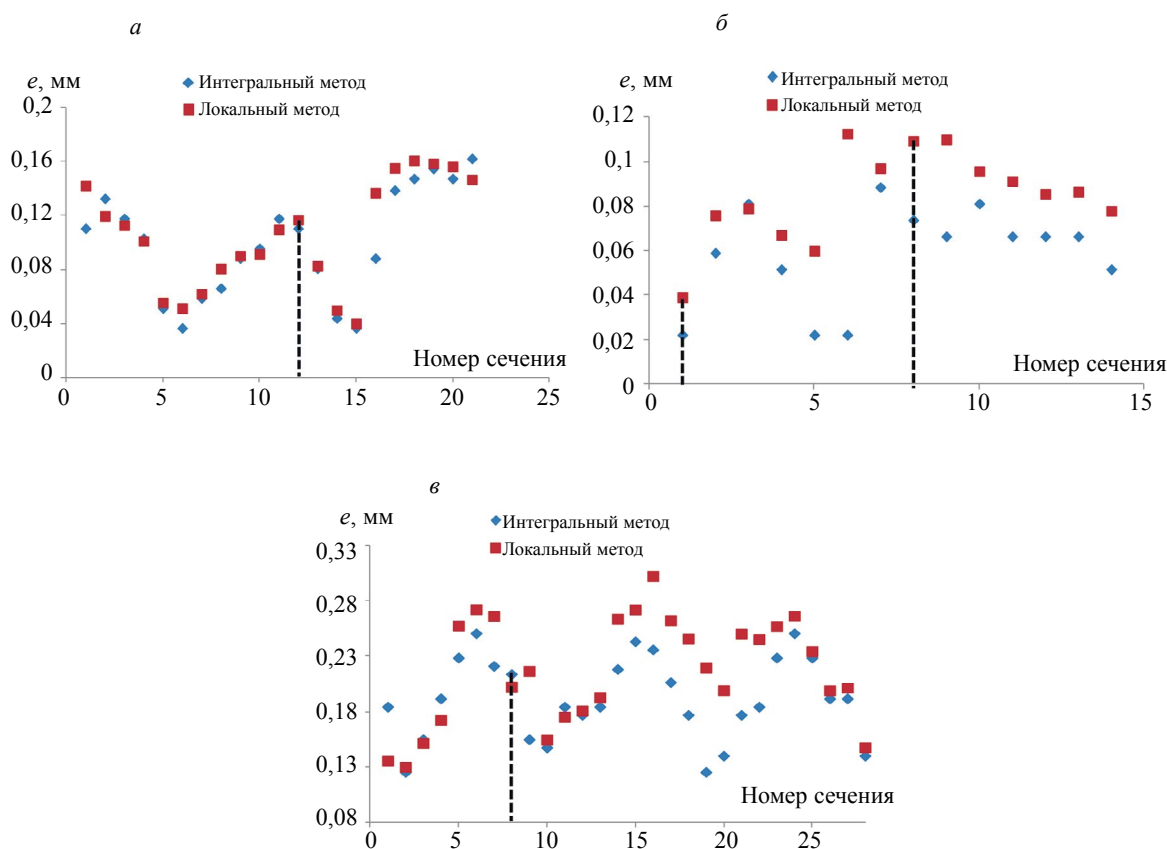


Рис. 8. Значения неравномерности толщины образцов: образец № 1 (а); образец № 2 (б); образец № 3 (в).

На рис. 9 приведены результаты использования метода УЗ толщинометрии в локальных зонах по периметру трубы с шагом  $30^\circ$  и по длине трубы с шагом 10 мм в виде круговых диаграмм толщины по некоторым сечениям, соответствующим максимальным (образец № 3, сечение 8), минимальным (образец № 2, сечение 1) и средним (образец № 1, сечение 12, образец № 2, сечение 8) значениям эксцентриситета, определенным интегральным методом (выделены штриховой линией на рис. 8). Диаграммы подтверждают наличие существенной неравномерности толщины стенки трубы, по виду близкой к эксцентриситету.

На рис. 8 дополнительно представлены результаты оценки неравномерности толщины стенки с использованием локальной УЗ толщинометрии. Наблюдается удовлетворительное согласование результатов оценки неравномерности толщины стенки трубы, полученное с использованием локального и интегрального методов. По некоторым сечениям имеет место некоторое превышение результатов локального метода, в сравнении с интегральным, что может быть обусловлено отклонением формы неравномерного сечения от круга с эксцентриситетом. Более

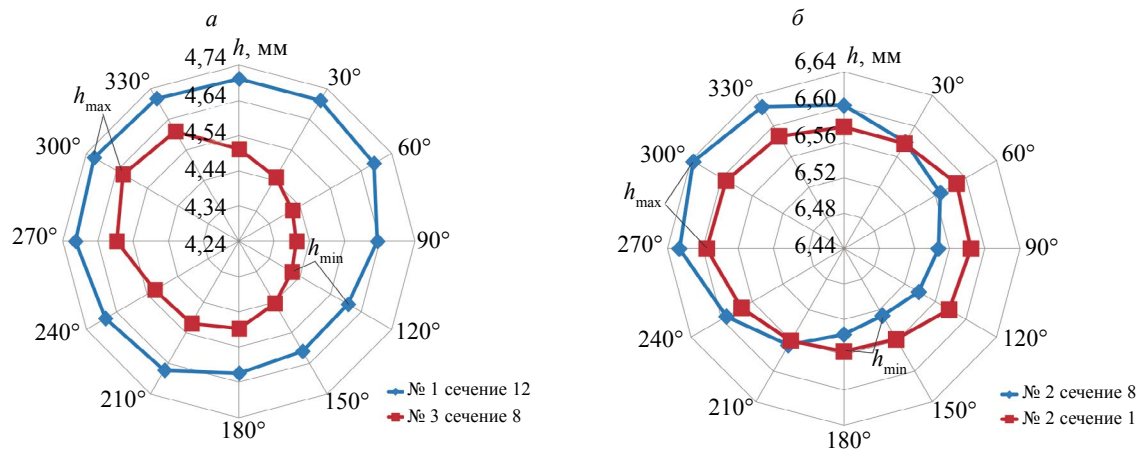


Рис. 9. Значения неравномерности толщины стенки трубы в различных сечениях образцов, полученные локальным методом УЗ толщинометрии.

существенные различия наблюдаются для образца № 2 с малой неравномерностью по толщине стенки, где чувствительность интегрального метода снижается.

Для исследованных образцов наблюдается высокая корреляция между результатами оценки эксцентриситета, полученными интегральным и локальным методами (рис. 10а), коэффициент достоверности аппроксимации составляет 0,84.

С целью оценки адекватности предложенной модели описания процесса распространения волны по сечению трубы с эксцентриситетом полученные экспериментально интегральным методом значения эксцентриситета закладывались в модель и определялось соответствующее время  $\Delta t_{\text{мод}}$ . Представленный на рис. 10б график корреляции между временем  $\Delta t_{\text{инт}}$ , определенным интегральным методом, и временем  $\Delta t_{\text{мод}}$ , определенным с использованием предложенной модели с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,92$ , свидетельствует об адекватности предложенной модели описания процесса распространения волны по сечению трубы с эксцентриситетом. Различия могут быть обусловлены отклонениями в рабочей частоте.

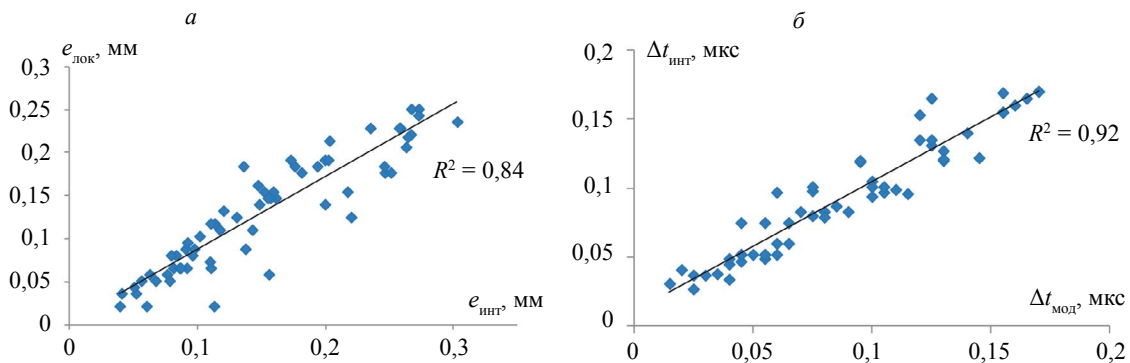


Рис. 10. График корреляции между результатами оценки эксцентриситета интегральным и локальным методами (а), график корреляции между временем  $\Delta t_{\text{инт}}$ , определенным интегральным методом, и временем  $\Delta t_{\text{мод}}$ , определенным с использованием предложенной модели (б).

## ВЫВОДЫ

1. Предложена модель процесса распространения акустической продольной волны по сечению трубы с эксцентриситетом сечения стенки трубы, основанная на принципе суперпозиции импульсов многократных переотражений, излучаемых (принимаемых) элементарными излучателями (приемниками) по огибающей наружной поверхности трубы, прошедших различное расстояние вследствие наличия эксцентриситета.

2. С использованием предложенной модели обоснована методика интегральной оценки неравномерности (эксцентриситета) толщины стенки труб малого диаметра, описываемая однозначной зависимостью с эксцентриситетом времен, соответствующих участкам с максимальной и минимальной толщиной стенки.

3. Экспериментальная методика интегральной оценки эксцентриситета сечения стенки трубы малого диаметра реализована на образцах труб цилиндров глубинно-штангового насоса с использованием специализированного гибкого пьезопреобразователя на основе поливиниденфторида, размещаемого по периметру трубы.

4. Предложенная методика интегральной оценки верифицирована по результатам локальной ультразвуковой толщинометрии (коэффициент достоверности аппроксимации 0,84), а также проверена на адекватность с использованием предложенной модели (коэффициент достоверности аппроксимации 0,92).

5. Предлагаемая методика может быть реализована за счет поступательного движения трубы относительно акустического преобразователя, что существенно повышает ее производительность и достоверность в сравнении с локальным УЗ методом, требующим сканирования каждого сечения трубы по ее периметру и длине.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FZZN-2025-0003) с использованием уникальной научной установки «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. № 586308).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Насыбуллин А.В., Дьяконов А.А., Саяхов В.А., Денисов О.В., Шайхразиева Л.Р., Шайдуллин Л.К. Исследование материалов и технологий изготовления нефтепромыслового скважинного насосного оборудования // СТИН. 2024. № 2. С. 16—20. EDN AWSCPG.
2. Беляковский М.А., Зюзин В.И., Третьяков А.В. Технология прокатного производства / Справочник в 2-х книгах. М.: Металлургия, 1991. 862 с.
3. Друян В.М., Крупман Ю.Г., Ляховский Л.С. Производство стальных труб. М.: Металлургия, 1989. 398 с.
4. Плотников А.Л., Као С.Ч., Курсин О.А., Егоров Н.И., Фам С.Б., Ли С.В. Исследование финишной абразивной обработки деталей машин из низкоуглеродистых сталей // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 8 (187). С. 38—41. EDN WZQJQL.
5. Шаталов Р.Л., Загоскин Е.Е., Медведев В. А. Влияние неравномерности изменения температуры на механические свойства деформирующего инструмента прокатно-прессовой линии // Металлург. 2023. № 8. С. 18—22. DOI: 10.52351/00260827\_2023\_08\_18. EDN ERUPKP.
6. Муравьев В. В., Хомутов А. С., Муравьева О. В., Степанова Е. А., Попова В. Д. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27. № 2. С. 87—96. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96
7. Стрижак В. А., Хасанов Р. Р., Хомутов А. С., Торхов К. А., Пушин П. Н. Оценка чувствительности к дефектам и исследование скоростей волн в трубах-заготовках цилиндров глубинного штангового насоса волноводным акустическим методом // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27. № 3. С. 86—100. EDN PKTDNX. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100
8. Хомутов А.С., Муравьев В.В. Выявление дефектов цилиндра глубинно-штангового насоса после ионного азотирования // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21. № 2. С. 16—26. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-16-26. EDN TIHDED.
9. Леун Е.В. Совершенствование способов и средств контроля отклонений от прямолинейности на основе акустооптических гетеродинных лазерных измерительных систем // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 71—77. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-71-77. EDN LVPEMF.
10. Han Ya, Fan Ju, Yang X. A structured light vision sensor for on-line weld bead measurement and weld quality inspection // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. V. 106. No. 5. P. 2065—2078. DOI: 10.1007/s00170-019-04450-2. EDN UITXNJ.
11. Михайлов И. В., Алиагаев А. Р. Анализ и перспективы применения автоматизированных технологий и лазерной триангуляции для визуального контроля качества сварных швов на производстве прямошовных сварных труб большого диаметра // Инженерный вестник Дона. 2024. № 7(115). С. 1—14. EDN UTBJYZ.
12. Беллис М. Трехмерная визуализация в неразрушающем контроле // В мире неразрушающего контроля. 2019. Т. 22. № 4. С. 26—30. DOI: 10.12737/article\_5dcc068183a300.21649852. EDN DKGCZC.
13. Stepanov V. A., Moos E. N., Shadrin M. V., Solovyov D. A., Ivanova I. V. A triangulation sensor for measuring the displacements and high-precision monitoring of the production performance // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2020. V. 13. №. 1. P. 54—65. DOI: 10.18721/JPM.13105. EDN BTAWTZ.

14. Оптический метод измерения толщины непосредственно в прокатном стане // Черные металлы. 2015. № 12(1008). С. 27—28. EDN WERAMJ.
15. *Wasif R., Tokhi M. O., Shirkoobi G. H., Marks R., Rudlin J.* Development of Permanently Installed Magnetic Eddy Current Sensor for Corrosion Monitoring of Ferromagnetic Pipelines // *Applied Sciences*. 2022. V. 12. P. 1037. DOI: 10.3390/app12031037
16. *Xie L., Gao B., Tian G. Y., Tan J., Feng B., Yin Y.* Coupling pulse eddy current sensor for deeper defects NDT // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. V. 293. No. 1. P. 189—199. DOI: 10.1016/j.sna.2019.03.029
17. *Sun H., Shi Y., Zhang W.* RFEC Based Oil Downhole Metal Pipe Thickness Measurement // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2021. V. 40. P. 35. DOI: 10.1007/s10921-021-00766-w
18. *Nash C., Karve P., Adams D.* Diagnosing nuclear power plant pipe wall thinning due to flow accelerated corrosion using a passive, thermal non-destructive evaluation method: Feasibility assessment via numerical experiments // *Nuclear Engineering and Design*. 2022. V. 386. P. 111542. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2021.111542
19. *Yang R., He Y., Zhang H., Huang S.* Through coating imaging and nondestructive visualization evaluation of early marine corrosion using electromagnetic induction thermography // *Ocean Engineering*. 2018. V. 147. No. 1. P. 277—288. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.09.023
20. *Liu H., Zhang L., Liu H. F., Chen S., Wang S., Wong Z. Z., Yao K.* High-frequency ultrasonic methods for determining corrosion layer thickness of hollow metallic components // *Ultrasonics*. 2018. V. 89. P. 166—172. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.05.006
21. *Rahim M., Arai Y., Araki W.* Effects of thickness variation due to presence of roller wake on the thickness measurement using laser ultrasonic technique // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. V. 132. P. 339—348. DOI: 10.1007/s00170-024-13397-y
22. Зарубин В.П., Бычков А.С., Карабутов А.А., Симонова В.А., Кудинов И.А., Черепецкая Е.Б. Профилометрия твердых тел с помощью лазерной ультразвуковой томографии в реальном масштабе времени // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2018. № 1. С. 76—83. EDN OVBQWZ.
23. *Liu Y., Yang S., Gan C.* A novel laser ultrasonic thickness measurement method for metal plate based on spectral analysis // *Proceedings of URAI*. 2015. P. 324—329. DOI: 10.1109/URAI.2015.7358964
24. *Клюев В.В., Артемьев Б.В., Артемьев И.Б., Клюев З.В.* Рентгеновская толщинометрия в прокатном производстве цветных металлов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 7 (664). С. 67—78. EDN UARLQF.
25. *Raman Singh, Baldev Raj, U. Kamachi Mudali, Prabhakar Singh* Non-Destructive Evaluation of Corrosion and Corrosion-assisted Cracking. The American Ceramic Society, 2019. 448 p.
26. Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Кропачев О.Ю., Плеснецов С.Ю., Билык З.В., Хорошайло Ю.Е., Ефименко С.А., Салам Б. Бесконтактный спектральный экспресс-способ обнаружения коррозионных повреждений металлоизделий // Дефектоскопия. 2020. № 1. С. 14—21. DOI: 10.31857/S0130308220010029. EDN HJANZS.
27. *Муравьева О.В., Муравьев В.В., Синцов М.А., Волкова Л.В.* Выявляемость дефектов муфт насосно-компрессорных труб магнитным, вихретоковым и ультразвуковым многократно-теневым методами контроля // Дефектоскопия. 2022. № 4. С. 14—25. DOI: 10.31857/S0130308222040029. EDN BLAXOE.
28. *Ding C., Tang D., Su R., He Y., Wang Q., Peng Y., Tang Y., Li M.* The Research and Application of Wheeled Dry-Coupling Ultrasonic Technology in Steel Plate Thickness Measurement // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2023. V. 59. P. 753—766. DOI: 10.1134/S1061830923600168
29. *Ануфриев Б.Ф., Аблеев А.Н., Мартыненко С.П., Мартыненко С.С.* Ультразвуковая система контроля толщины стенки и коррозионных повреждений тонкостенных труб // Датчики и системы. 2021. № 5 (258). С. 10—14. DOI: 10.25728/datsys.2021.5.2. EDN YENNYS.
30. *Liu T., Pei C., Cai R., Li Y., Chen Z.* A Flexible and Noncontact Guided-wave Transducer based on Coils-only EMAT for Pipe Inspection // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. V. 314. P. 112213. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112213
31. *Liu Y., Feng X.* A novel methodology based on the reflected L(0,1) guided wave for quantitative detection of corrosion-induced wall thickness loss in continuous pipes // *J. Civil. Struct. Health Monit.* 2024. V. 14. P. 67—82. DOI: 10.1007/s13349-023-00699-0
32. Зе-Ю Д., Хай-Тао В., Сиань-Мин Я., Синь Л., Джун Ш., Мэн Х. Ц. Исследование по оценке толщины корабельных палубных балок методом на основе волн Лэмба // Дефектоскопия. 2020. № 7. С. 10—20. DOI: 10.31857/S0130308220070027. EDN OKEOKN.
33. *Толстов Х.Б.* Измерение толщины тонких пленок с использованием гармонических антисимметричных волн Лэмба // Измерительная техника. 2018. № 6. С. 70—72. EDN XVLUKD.
34. *Trushkevych O., Dixon S., Tabatabaeipour M., Potter M. D. G., MacLeod C., Dobie G., Edwards R.* Calibration-free SH guided wave analysis for screening of wall thickness in steel with varying properties // *NDT & E International*. 2023. V. 135. P. 102789. DOI: 10.1016/j.ndteint.2023.102789
35. *Терентьев Д.А.* Интегральная толщинометрия // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 1 (63). С. 59—62. EDN RYXGRR.
36. *Муравьева О.В., Муравьев В.В., Шихарев П.А., Белослудцев К.Ю.* Оценка неравномерности акустических и упругих свойств рессорных пружин сжатия // Дефектоскопия. 2025. № 4. С. 29—41. DOI: 10.31857/S0130308225040038. EDN JWZQHA.

## REFERENCE

1. *Nasybullin A.V., Dyakonov A.A., Sayakhov V.A., Denisov O.V., Shaykhrazieva L.R., Shaydullin L.K.* Study of materials and manufacturing technology of oilfield well pumping equipment // *STIN*. 2024. No. 2. P. 16—20. EDN AWSCPG.
2. *Benyakovsky M.A., Bogoyavlensky K.N., Vitkin A.I., Garber E.A., Zyuzin V.I., Tretyakov A.V.* Rolling production technology / A reference book in 2 books. Moscow: Metallurgy, 1991. 862 p.
3. *Druyan V.M., Krupman Yu.G., Lyakhovsky L.S.* Production of steel pipes. Moscow: Metallurgy, 1989. 398 p.
4. *Plotnikov A.L., Kao S.C., Kursin O.A., Egorov N.I., Fam S.B., Li S.V.* Investigation of finishing abrasive treatment of machine parts made of low-carbon steels // *Izvestia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. No. 8 (187). P. 38—41. EDN WZQJQL.
5. *Shatalov R.L., Zagoskin E.E., Medvedev V.A.* Effects of Uneven Temperature Variations on the Mechanical Properties of a Rolling and Pressing Line Deforming Tool // *Metallurgist*. 2023. V. 67. No. 7—8. P. 1086—1092. DOI: 10.1007/s11015-023-01600-6. EDN JMQPIA.
6. *Murav'ev V.V., Khomutov A.S., Murav'eva O.V., Stepanova E.A., Popova V.D.* Formation of Residual Stresses in the Cylinders of Deep-Rod Pumps after Manufacturing Operations // *Vestnik IzhGTU Imeni M.T. Kalashnikova*. 2024. V. 27. No. 2. P. 87—96. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96. EDN JUTAFX.
7. *Strizhak V.A., Khasanov R.R., Khomutov A.S., Torkhov K.A., Pushin P.N.* Waveguide Acoustic Control of Pipes — Billets of Deep Rod Pumps // *Vestnik IzhGTU Imeni M.T. Kalashnikova*. 2024. V. 27. No. 3. P. 86—100. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100. EDN PKTDNX.
8. *Khomutov A.S., Murav'ev V.V.* Flaw detection in the deep-rod pump cylinder after ion nitriding // *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023. V. 21. No. 2. P. 16—26. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-16-26. EDN TIHDED.
9. *Leun E.V.* Improvement of methods and means of control of deviations from straightness by using acousto-optic heterodyne laser measuring systems // *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2019. No. 4 (166). P. 71—77. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-71-77. EDN LVPPEMF.
10. *Han Ya, Fan Ju, Yang X.* A structured light vision sensor for on-line weld bead measurement and weld quality inspection // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. V. 106. No. 5. P. 2065—2078. DOI: 10.1007/s00170-019-04450-2. EDN UITXHJ.
11. *Mikhaylov I.V., Aliagaev A.R.* Analysis and prospects for the application of automated technologies and laser triangulation for visual inspection of weld quality in the production of large-diameter longitudinally welded pipes // *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2024. No. 7 (115). P. 1—14. EDN UTBJYZ.
12. *Bellis M.* 3D imaging for nondestructive testing // *V mire nerazrushayushchego kontrolya*. 2019. V. 22. No. 4. P. 26—30. DOI: 10.12737/article\_5dcc068183a300.21649852. EDN DKGCCZC.
13. *Stepanov V.A., Moos E.N., Shadrin M.V., Solovyov D.A., Ivanova I.V.* A triangulation sensor for measuring the displacements and high-precision monitoring of the production performance // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2020. V. 13. No. 1. P. 54—65. DOI: 10.18721/JPM.13105. EDN BTAWTZ.
14. *Optical thickness measurement method directly in the rolling mill* // *Chernye Metally*. 2015. No. 12 (1008). P. 27—28. EDN WERAMJ.
15. *Wasif R., Tokhi M. O., Shirkoohi G. H., Marks R., Rudlin J.* Development of Permanently Installed Magnetic Eddy Current Sensor for Corrosion Monitoring of Ferromagnetic Pipelines // *Applied Sciences*. 2022. V. 12. P. 1037. DOI: 10.3390/app12031037.
16. *Xie L., Gao B., Tian G. Y., Tan J., Feng B., Yin Y.* Coupling pulse eddy current sensor for deeper defects NDT // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. V. 293. No. 1. P. 189—199. DOI: 10.1016/j.sna.2019.03.029.
17. *Sun H., Shi Y., Zhang W.* RFEC Based Oil Downhole Metal Pipe Thickness Measurement // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2021. V. 40. P. 35. DOI: 10.1007/s10921-021-00766-w.
18. *Nash C., Karve P., Adams D.* Diagnosing nuclear power plant pipe wall thinning due to flow accelerated corrosion using a passive, thermal non-destructive evaluation method: Feasibility assessment via numerical experiments // *Nuclear Engineering and Design*. 2022. V. 386. P. 111542. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2021.111542.
19. *Yang R., He Y., Zhang H., Huang S.* Through coating imaging and nondestructive visualization evaluation of early marine corrosion using electromagnetic induction thermography // *Ocean Engineering*. 2018. V. 147. No. 1. P. 277—288. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.09.023.
20. *Liu H., Zhang L., Liu H. F., Chen S., Wang S., Wong Z. Z., Yao K.* High-frequency ultrasonic methods for determining corrosion layer thickness of hollow metallic components // *Ultrasonics*. 2018. V. 89. P. 166—172. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.05.006.
21. *Rahim M., Arai Y., Araki W.* Effects of thickness variation due to presence of roller wake on the thickness measurement using laser ultrasonic technique // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. V. 132. P. 339—348. DOI: 10.1007/s00170-024-13397-y.
22. *Zarubin V.P., Bychkov A.S., Karabutov A.A., Simonova V.A., Kudinov I.A., Cherepetskaya E.B.* Real-time laser ultrasound tomography for profilometry of solids // *Moscow University Physics Bulletin*. 2018. V. 73. No. 1. P. 75—82. DOI: 10.3103/S0027134918010150. EDN IPCKRR.

23. Liu Y., Yang S., Gan C. A novel laser ultrasonic thickness measurement method for metal plate based on spectral analysis // *Proceedings of URAI*. 2015. P. 324—329. DOI: 10.1109/URAI.2015.7358964
24. Klyuev V.V., Artem'ev B.V., Artem'ev I.B., Klyuev Z.V. X-ray thickness measurement in the rolling production of non-ferrous metals // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Mashinostroenie*. 2015. No. 7 (664). P. 67—78. EDN UARLQF.
25. Raman Singh, Baldev Raj, U. Kamachi Mudali, Prabhakar Singh Non-Destructive Evaluation of Corrosion and Corrosion-assisted Cracking. The American Ceramic Society, 2019. 448 p.
26. Suchkov G.M., Migushchenko R.P., Kropachek O.Y., Plesnetsov S.Y., Bilyk Z.V., Boussi S., Horoshailo Y.E., Efimenko S.A.. Noncontact Spectral Express Method for Detecting Corrosion Damage to Metal Products // *Defektoskopiya*. 2020. No. 1. P. 14—21. DOI: 10.1134/S1061830920010118. EDN QDHGSX.
27. Muraveva O.V., Muraviev V.V., Sintsov M.A., Volkova L.V. Detecting Flaws in Pumping-Compressor Pipe Couplings by Magnetic, Eddy Current, and Ultrasonic Multiple-Shadow Testing Methods // *Defektoskopiya*. 2022. No. 4. P. 14—25. DOI: 10.1134/S1061830922040088. EDN AKWOHF.
28. Ding C., Tang D., Su R., He Y., Wang Q., Peng Y., Tang Y., Li M. The Research and Application of Wheeled Dry-Coupling Ultrasonic Technology in Steel Plate Thickness Measurement // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2023. V. 59. P. 753—766. DOI: 10.1134/S1061830923600168
29. Anufriyev B.F., Ableev A.N., Martinenko S.P., Martinenko S.S. Ultrasonic system for monitoring wall thickness and corrosion damage of thin-walled tubes // *Datchiki i Systemi*. 2021. No 5 (258). P. 10—14. DOI: 10.25728/datsys.2021.5.2. EDN YENNYS.
30. Liu T., Pei C., Cai R., Li Y., Chen Z. A Flexible and Noncontact Guided-wave Transducer based on Coils-only EMAT for Pipe Inspection // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. V. 314. P. 112213. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112213
31. Liu Y., Feng X. A novel methodology based on the reflected L(0,1) guided wave for quantitative detection of corrosion-induced wall thickness loss in continuous pipes // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2024. V. 14. P. 67—82. DOI: 10.1007/s13349-023-00699-0
32. Ze-Yu Dong, Hai-Tao Wang, Xin Li, Jun Xu, Xian-Ming Yang, Meng-Hao Jiang Research for Evaluation Method Based on Lamb Waves for Thickness of Ship Deck Beams // *Russian Journal of Nondestructive Testing Defektoskopiya*. 2020. No. 7. P. 10—20. DOI: 10.1134/S1061830920070049
33. Tolipov K.B. Measuring of the thickness of thin films with the use of harmonic antisymmetric Lamb waves // *Measurement Techniques*. 2018. No. 6. P. 639—642. DOI: 10.1007/s11018-018-1477-3. EDN GOHJKW.
34. Trushkevych O., Dixon S., Tabatabaeipour M., Potter M. D. G., MacLeod C., Dobie G., Edwards R. Calibration-free SH guided wave analysis for screening of wall thickness in steel with varying properties // *NDT & E International*. 2023. V. 135. P. 102789. DOI: 10.1016/j.ndteint.2023.102789
35. Terentyev D.A. Integral thickness gauging // *V mire nerazrushayushchego kontrolya*. 2014. No. 1 (63). P. 59—62. EDN RYXGRR.
36. Muravieva O.V., Muraviev V.V., Shikharev P.A., Beloshudtsev K.Yu. Evaluation of the non-uniformity of acoustic and elastic properties of compression coil springs // *Defektoskopiya*. 2025. No. 4. P. 29—41. DOI: 10.31857/S0130308225040038. EDN JWZQHA.