

УДК 620.179.16

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100

Оценка чувствительности к дефектам и исследование скоростей волн в трубах-заготовках цилиндров глубинного штангового насоса волноводным акустическим методом*

В. А. Стрижак, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Р. Р. Хасанов, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. С. Хомутов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

К. А. Торхов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

П. Н. Пушин, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Глубинные штанговые насосы являются дорогостоящим необслуживаемым оборудованием для добычи нефти из скважин. Исключение бракованных труб-заготовок из технологического цикла изготовления элементов таких насосов существенно влияет как на стоимость их производства, так и на себестоимость добычи. Для сплошного входного контроля труб-заготовок цилиндров штанговых насосов предложен волноводный метод. Он не требует сканирования и обладает высокой чувствительностью как к внутренним, так и к поверхностным дефектам. Произведена экспериментальная оценка чувствительности метода к дефектам в виде наплыва, расположенного на наружной и внутренней поверхности толстостенной трубы диаметром 59,3 мм и толщиной стенки 14 мм. Эхоимпульс от искусственного отражателя при перемещении отражателя с внешней стороны трубы на внутреннюю сторону уменьшился на 2 дБ. Определены критерии браковки трубы-заготовки по уровню сигнала на первом отражении R1, на 8 отражении RN и по коэффициенту затухания β . В результате дефектоскопии труб-заготовок обнаружена труба с существенным дефектом. Проведено экспериментальное исследование акустических свойств партии труб диаметром 58 мм в состоянии поставки. Для труб-заготовок цилиндра глубинного штангового насоса в состоянии поставки определена нижняя допустимая граница годности по скорости крутильной волны 3255 м/с. Оценено влияние технологических операций высокого отпуска и правки на их акустические свойства. Показана возможность контроля качества при выполнении операции отпуска волноводным методом. Выявлено, что при процедуре отпуска скорость крутильной волны увеличивается в среднем по партии на 27 м/с.

Ключевые слова: глубинный штанговый насос, волноводный акустический контроль, крутильные волны, стержневые волны, трубные заготовки.

Введение

Глубинный штанговый насос (ГОСТ 31835–2012 «Насосы скважинные штанговые. Общие технические требования») является сложным механическим устройством, к которому предъявляются повышенные требования надежности. Глубинный штанговый насос (ГШН) располагается в основании скважины на значительной глубине. Эксплуатация ГШН производится длительное время без доступа к нему персонала, а ревизия скважины с извлечением насоса является технически сложной процедурой и требует существенных затрат. Повышение надежности работы элементов устройства за счет уменьшения количества его аварийных остановок существенно влияет на себестоимость добычи [1–3]. Основные элементы насоса изготавливаются из трубного сортамента по ТУ 14-159-1128–2008 «Трубы стальные бес-

шовные горячедеформированные хладостойкие для газопроводов газлифтных систем и обустройства газовых месторождений». Заготовки для ГШН производятся из прецизионных труб (точность изготовления по диаметру $\pm 1\%$, толщины стенки $\pm 12,5\%$). Материал определяется условиями эксплуатации насосов. Как правило, используются стали марок 38Х2МЮА, 50Г, 40Х, 45. В процессе изготовления элементов насоса на подготовительном этапе труба-заготовка подвергается отпуску с последующей правкой, и после придания необходимых геометрических параметров рабочие поверхности цилиндра и штока подвергаются закалке ТВЧ или азотируются с последующим шлифованием и полированием [4]. Качество подготовительных работ наряду с качеством труб-заготовок существенно влияет на свойства готовой продукции. Таким образом, исключение заведомо

© Стрижак В. А., Хасанов Р. Р., Хомутов А. С., Торхов К. А., Пушин П. Н., 2024

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252>

бракованных труб-заготовок из технологического цикла изготовления элементов ГШН и контроль качества подготовительных этапов – важные задачи, которые влияют и на стоимость производства ГШН, и на себестоимость добычи.

Наиболее крупными деталями ГШН являются шток и цилиндр, выполняющий функцию корпуса агрегата. Трубы-заготовки для этих деталей поступают на производство в виде изделий длиной от 3300 до 4300 мм с нанесенным на боковой поверхности в районе торца индивидуальным номером. В качестве труб-заготовок ГШН используется сортамент труб от 57 до 219 мм, изготовленный по ГОСТ 8732–78 «Трубы стальные бесшовные горячедеформированные». Обычно трубы подвергаются выборочному контролю, либо используются методы контроля со сканированием на основе магнитоиндукционных и вихретоковых преобразователей [5–7]. Несмотря на преимущество бесконтактной работы, указанные методы выявляют лишь поверхностные и приповерхностные дефекты [8, 9]. Методам присуща сложность с идентификацией дефектов ввиду отсутствия однозначной связи между механическими свойствами объекта контроля и измеряемыми магнитными и электрическими величинами. К существенным недостаткам относятся также чувствительность к изменениям зазора, магнитным свойствам объекта контроля, скорости движения проката при контроле, остаточная намагниченность, магнитные пятна. Альтернативой электромагнитным и вихретоковым методам контроля являются акустические методы, позволяющие комплексно оценить механические характеристики изделий [10–13]. Тем не менее использование сканирования при полном входном контроле труб повлечет за собой построение крупного механизированного станка, обеспечивающего перемещение сканирующего узла вдоль поверхности трубы с дополнительным пространством, длиной в объект контроля – до узла сканирования и после узла сканирования.

Акустический метод контроля, не требующий сканирования, основан на волноводной методике с использованием датчика, устанавливаемого на торец трубы. Технология волноводного акустического контроля не требует дополнительной подготовки поверхности объекта контроля, применения контактных жидкостей или иммерсионной среды, обладает высокой чувствительностью как к внутренним, так и к поверхностным дефектам [14–17]. Импульс, генерируемый излучателем, распространяется в объекте контроля до противоположного торца

и возвращается обратно к приемнику. Акустический импульс, отраженный от дефектов типа нарушения сплошности, а также от противоположного торца объекта контроля, принимается преобразователем и в виде электрического сигнала поступает в информационную систему дефектоскопа [18, 19].

Целью работы является опробование волноводной методики при организации сплошного входного контроля труб-заготовок цилиндра глубинного штангового насоса, обоснование возможности его дефектоскопии и оценка качества технологических операций при подготовке к изготовлению.

Используемые методы исследования

Методика акустического контроля без сканирования использует волноводные эффекты и предусматривает выбор необходимого типа волн – крутильной или стержневой [20–22]. Все тело объекта контроля рассматривается как акустический волновод, по которому с низким затуханием распространяется акустический импульс [23–25]. Реализация акустической волноводной методики осуществляется с использованием специализированного оборудования с центральной частотой приемного тракта 25 кГц. С торца объекта контроля возбуждается акустическая волна большей длины, чем геометрический размер сечения объекта контроля. Акустическая волна распространяется вдоль объекта контроля и, отразившись от противоположного торца, возвращается в зону установки датчика. При структуроскопии используются эффекты изменения параметров прохождения акустических импульсов (скорость, затухание и др.) в зависимости от свойств материала или геометрии объекта контроля. При дефектоскопии используются волноводные эффекты при отражении акустической волны от аномалий и дефектов. В зоне нахождения дефекта объект контроля имеет отклонение от среднего значения по величине механического импеданса:

$$Z_{\text{мех}} = \rho CS = \sqrt{E\rho S},$$

где ρ – удельная плотность металла; C – скорость распространения акустической волны; S – площадь поперечного сечения волновода; E – модуль упругости.

Изменение механического импеданса позволяет оценить взаимодействие акустических волн с дефектами, ослабляющими поперечное сечение: плены, закаты, утяжины, вмятины, инородные включения, поперечные трещины. Таким

образом, метод чувствителен к дефектам, приобретенным объектом контроля при изготовлении, и к дефектам, приобретенным в процессе транспортировки или эксплуатации. С учетом связи скорости акустической волны с особенностями структурного состояния материала также возможна оценка механических свойств материала трубы [26, 27]:

$$C_0 = \sqrt{E/\rho}, \quad C_t = \sqrt{G/\rho},$$

где C_0 – скорость стержневой волны, м/с; E – модуль Юнга, Па; ρ – плотность, кг/м³; C_t – скорость крутильной волны, м/с; G – модуль сдвига, Па.

При этом следует учитывать возросшие возможности по измерению скорости звуковой волны с высокой точностью [28, 29].

Технология акустического контроля протяженных объектов реализована в дефектоскопе АДНШ-П (в Госреестре утвержденных типов средств измерений № 82936-21). Центральная частота измерительного тракта составляет 25 кГц, метод возбуждения – ударный импульс

амплитудой 250 В. Датчик крутильной волны (рис. 1) использует набор электромагнитно акустических преобразователей (ЭАП) и обеспечивает совмещенный режим излучения и приема акустических волн. ЭАП состоит из механизма установки, узла согласования 1, направляющих 3 и трех модулей с индукторами 2. Модуль содержит обмотки и коромысло с магнитами, создающими приложенное по нормали к поверхности трубы магнитное поле. При излучении под действием ударного импульса обмотки создают в поверхностном слое трубы тангенциальные смещения, а при приеме обмотки фиксируют крутильные колебания тела трубы.

На боковой поверхности расположено квадратное отверстие для установки ключа 6. Ключ позволяет зафиксировать индукторы на торцевой части трубы с усилием. Установка преобразователя ЭАП производится при полностью разведенных индукторах. Преобразователь насаживается на торец трубы до упора, после чего индукторы сводятся до плотного контакта с поверхностью трубы.

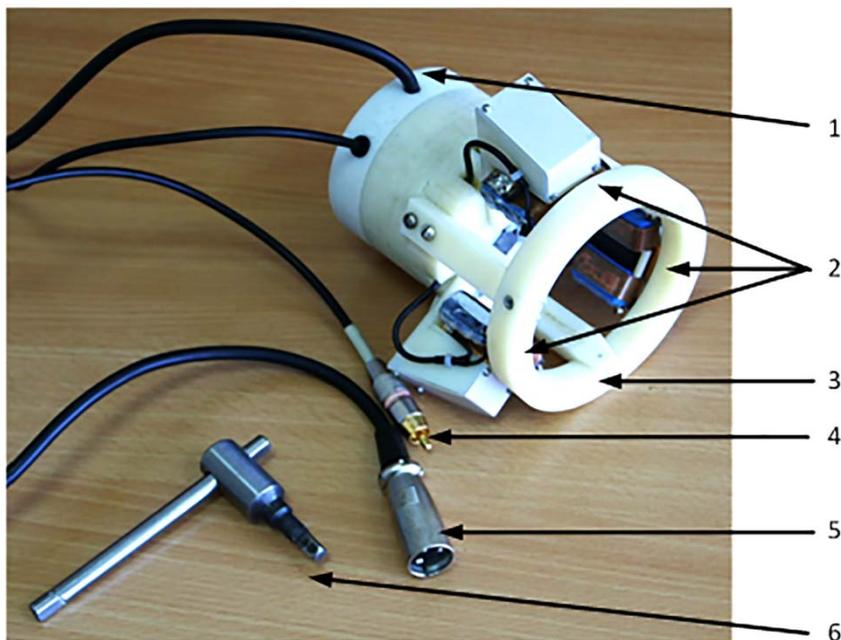


Рис. 1. Внешний вид преобразователя ЭАП: 1 – узел согласования; 2 – электромагнитные индукторы; 3 – направляющие с охранным кольцом; 4, 5 – разъемы для подключения преобразователя; 6 – ключ

Fig. 1. The appearance of the EMA transducer: 1 - matching node; 2 - electromagnetic inductors; 3 - guides with a guard ring; 4, 5 - connectors for connecting the transducer; 6 - key

Возбуждение стержневой волны реализуется с использованием индуктора в виде обмотки, расположенной на краю трубы соосно с ней. Ударный импульс в обмотке за счет наведенного в теле трубы противотока создает импульс

силы, направленной согласно с осью трубы. Прием осуществляется пьезоэлектрическим преобразователем, установленным на торце.

Результаты прозвучивания выводятся на экран персонального компьютера в виде двух

графических эхограмм (звено 0 и звено 1). Звено 0 предназначено для сохранения сигналов без ограничения. Звено 1 имеет дополнительный коэффициент усиления и предназначено для более подробного рассмотрения дефектных участков. Для отстройки от качества акустического контакта импульс первого донного сигнала принимается за 100 % (0 дБ). Далее звено 0 пересчитывается в процентах или дБ от величины 1-го донного отражения. Эхограммы сохраняются в памяти персонального компьютера для дальнейшей обработки.

В качестве дополнительных параметров рассчитывается скорость акустической волны C_0 и C_l и для крутильной волны C_t коэффициент затухания донных импульсов β . Расчет скорости производится на участке между 1-м и 2-м донным импульсом. Временной интервал корректируется с использованием функции корреляции

$$C = 2L/t,$$

где L – длина объекта контроля; t – время между донными импульсами.

Затухание амплитуды донных импульсов β определяется по эхограмме как среднее значение коэффициентов затухания β_N , полученных для интервалов между 1-м и N -м отражением, где $N = 2 \dots 8$:

$$\beta_N = \frac{-1}{2L(N-1)} \ln \frac{A_N}{A_1}, \quad (4)$$

где A_N – значение амплитуды N донного импульса, В; A_1 – значение амплитуды первого донного импульса, В; L – длина объекта, м; N – номер отражения донного импульса.

Разрешающая способность измерения скорости составила 0,8 м/с. Она определяется допусковым отклонением действительной длины используемой рулетки по 3-му классу точности ± 1 мм и разрешающей способностью дефектоскопа в области измерения времени при частоте дискретизации в 5 МГц. Методика измерения времени реализована через корреляционное сравнение 1-го и 2-го донного импульса после их передискретизации с коэффициентом 8 и интерполяции промежуточных точек по линейному закону.

Дефектоскопия труб-заготовок

Вид эхограммы, получаемой при прозвучивании трубы крутильной волной, показан на примере трубы диаметром 54,2 мм, толщиной стенки 5,5 мм и длиной 3501 мм (рис. 2). Эхограмма получена в звене 0 дефектоскопа. На эхограмме можно выделить зондирующий импульс 4 и набор донных импульсов 2, 3. Для оценки характеристик сигналов амплитуда 1 первого донного импульса 2 принята за 100 % (0 дБ).

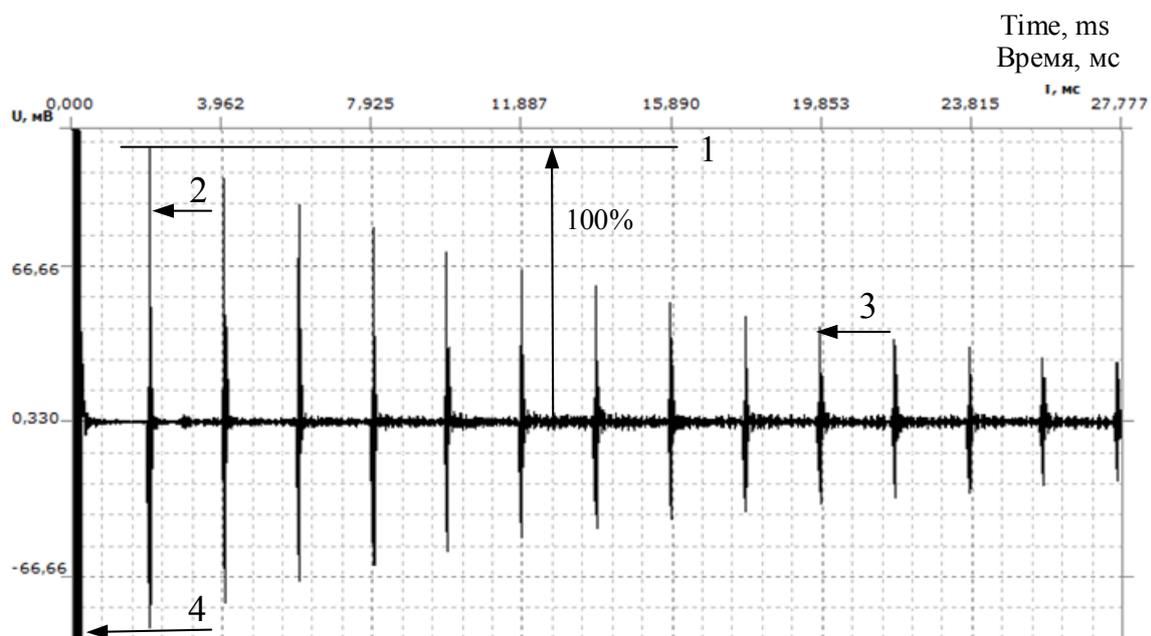


Рис. 2. Эхограмма крутильной волны на трубе (звено 0):

1 – уровень, принятый за 100 %; 2 – 1-й донный импульс; 3 – 10-й импульс; 4 – зондирующий импульс

Fig. 2. Echogram of a torsional wave on a pipe (link 0):

1 - the level taken as 100 %; 2 - the 1st bottom pulse; 3 - the 10th pulse; 4 - probing pulse

Для детального анализа сигналов на участке от зондирующего импульса до 1-го донного импульса, и на участке между 10-м и 11-м донными импульсами используется звено *I*, обладающее дополнительным коэффициентом усиления. Фрагмент эхограммы на участке от зондирующего до 1-го донного импульса показывает величину акустических шумов (уровень *RI*).

Акустические отклики от дефектов, превышающие средний уровень акустических шумов на этом участке, будут наблюдаться в виде локальных импульсов (рис. 3). Вертикальной линией обозначена мертвая зона *MZ*, где обнаружение дефектов затруднительно на фоне помехи, вызванной затухающим зондирующим импульсом.

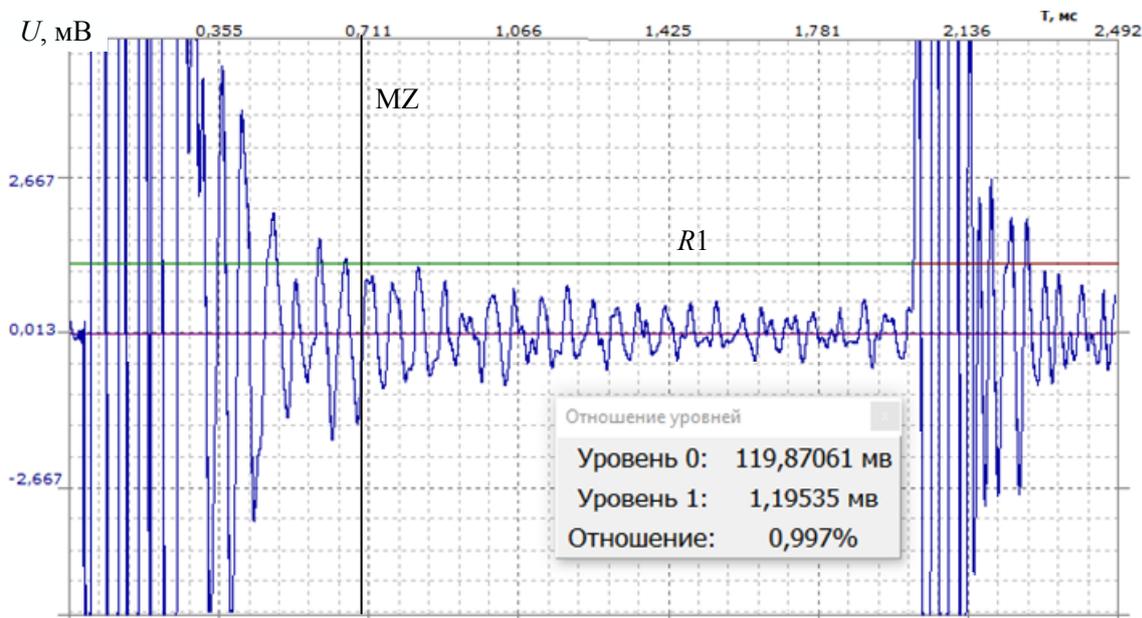


Рис. 3. Участок эхограммы между зондирующим и 1-м донным импульсом (звено *I*)

Fig. 3. Section of the echogram between the probing and 1st bottom pulse (link *I*)

Дополнительная возможность повышения чувствительности к мелким дефектам реализуется в методике с использованием многократных отражений. При многократном прохождении импульсов по телу трубы за счет переотражений эхосигналов возникает рост акустического отклика [30, 31]. На участке эхограммы между 10-м и 11-м импульсом отмечен уровень *RN*, соответствующий величине акустических шумов на выбранном участке эхограммы (рис. 4).

Для предварительной оценки чувствительности метода к дефектам разработан и изготовлен искусственный отражатель, закрепленный на пластиковой штанге длиной 1,66 м. Отражатель содержит магнит неодим-железо-бор (NdFeB) в виде параллелепипеда $5 \times 40 \times 12$ мм, устанавливаемый по образующей с наружной или внутренней поверхности трубы. Магнит ориентируется стороной 40×5 мм вдоль оси трубы, и в зоне механического контакта магнита и трубы за счет магнитного поля магнит создает эффект присоединенной массы – имитация дефекта – наплыв материала [32, 33].

Так как при использовании крутильных волн чувствительность метода контроля зависит от глубины залегания дефекта и падает с ее увеличением [34], в качестве экспериментальной трубы выбран образец длиной 3500 мм, диаметром 59,3 мм и толщиной стенки 14 мм. Искусственный отражатель последовательно устанавливался с внешней и с внутренней стороны трубы. По регистрируемой эхограмме оценивается эхосигнал от искусственного отражателя в процентах от величины 1-го донного импульса (рис. 5). Линией *I* показана амплитуда 1-го донного импульса, принятая за 100 %.

Несмотря на отсутствие нарушения сплошности стенки трубы в зоне искусственного отражателя и невозможности его поиска на 1-м отражении, отклик от искусственного отражателя наблюдается на эхограмме старших отражений (рис. 6). В силу особенностей прохождения акустического импульса по телу трубы на многократных отражениях сигнал от дефекта дублируется в правой и левой части анализируемого участка [35].

Отличия значений эхосигналов от искусственного отражателя, установленного на внеш-

ней и внутренней стороне трубы (табл. 1) представлены в % (дБ).

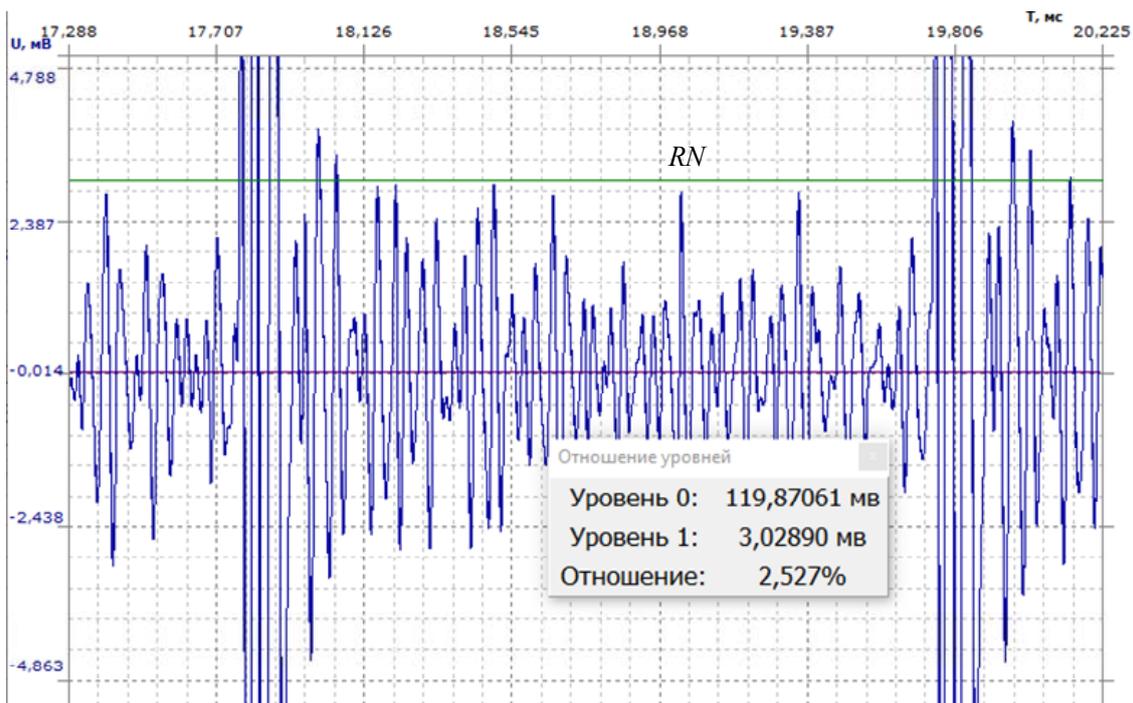


Рис. 4. Участок эхограммы между 10-м и 11-м донным импульсом (звено I)

Fig. 4. Section of the echogram between the 10th and 11th bottom pulses (link I)

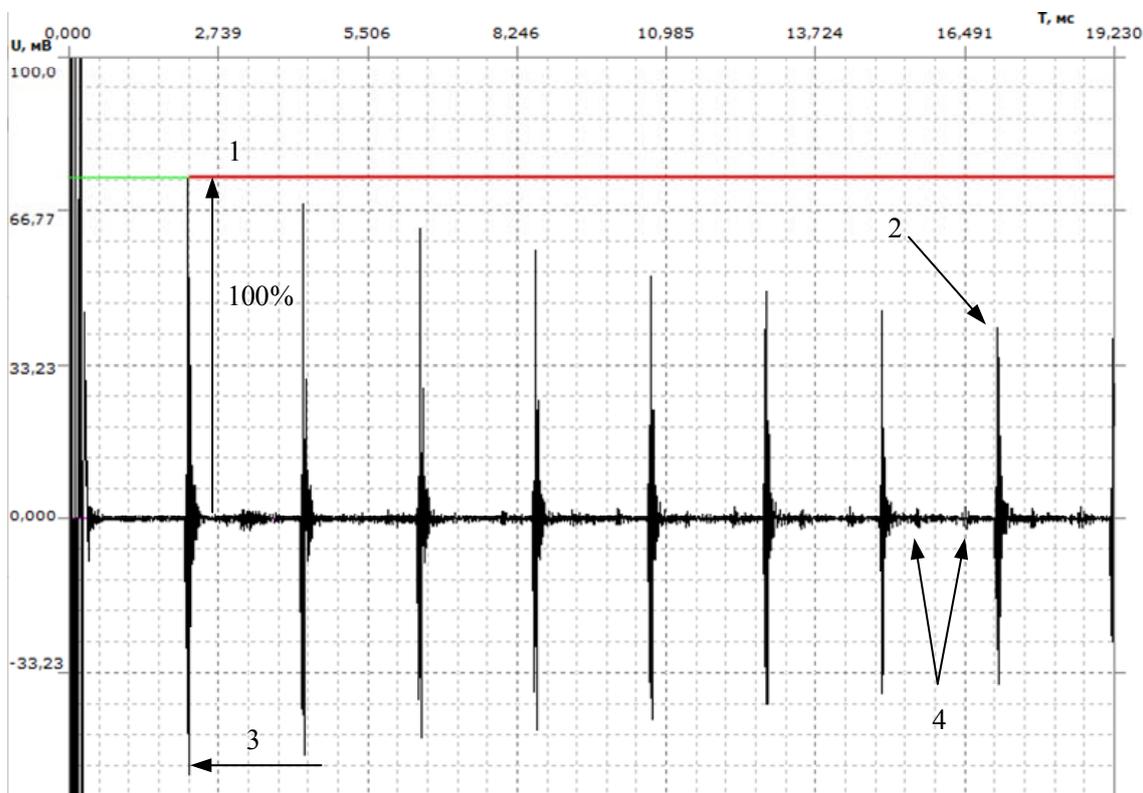


Рис. 5. Эхограмма трубы с искусственным отражателем (звено 0):

1 – уровень, принятый за 100 %; 2 – 8-й импульс; 3 – 1-й импульс; 4 – сигналы от искусственного отражателя

Fig. 5. Echogram of a pipe with an artificial reflector (link 0):

1 - the level taken as 100 %; 2 - the 8th pulse; 3 - the 1st pulse; 4 - signals from an artificial reflector



Рис. 6. Эхограмма трубы с искусственным отражателем на 8-м отражении (звено 1)

Fig. 6. Echogram of a pipe with an artificial reflector on the 8th reflection (link 1)

Таблица 1. Величина акустического отклика на искусственный отражатель

Table 1. The magnitude of the acoustic response to an artificial reflector

Расположение искусственного отражателя	Внешняя сторона	Внутренняя сторона
Эхосигнал от дефекта, % (дБ)	3,28 (-29,7)	2,62 (-31,6)
Уровень шума, % (дБ)	1,36 (-37,3)	1,36 (-37,3)

Для трубы с толщиной стенки 14 мм чувствительность метода к дефектам на внутренней поверхности трубы по сравнению с внешней поверхностью трубы на 8-м отражении меньше на 2 дБ. При этом величина эхосигнала превышает уровень шумов на 8 дБ от искусственного отражателя на внешней поверхности и на 6 дБ на внутренней поверхности трубы. Для труб с меньшей толщиной стенки отличие по чувствительности к дефектам на внутренней и внешней поверхности трубы будет значительно меньше.

По результатам прозвучивания партии годных труб-заготовок 32 шт. (наружный диаметр 58 мм, длина 4279 ± 1 мм и толщина стенки 6,9 мм) получен диапазон акустических характеристик β , $R1$, RN (табл. 2). Вне зависимости от технологического этапа подготовки труб-заготовок затухание β не превышает 13 км^{-1} , уровень акустического шума $R1$ не хуже минус 1 дБ, а RN (8) не хуже минус 23 дБ.

В условиях цеха произведена оценка акустических свойств труб заготовок $\varnothing 73$ мм, ранее забракованных службами предприятия (табл. 3). Основная причина браковки – несоответствие прямолинейности.

Существенных особенностей в эхограммах у образцов №№ 1–7 не выявлено. В образце № 8 наблюдается значительное затухание акустического импульса. Донный импульс с четвертого и далее образца не различим на уровне акустического шума. При этом значительный акустический шум на участке перед первым отражением начинается во второй половине трубы, что, видимо, приводит к существенной потере энергии акустического импульса (рис. 7).

При этом в образце № 8 визуально наблюдаются многократные нарушения сплошности тела. На фотографии (см. рис. 8) показан наиболее существенный дефектный участок, обнаруженный в центральной части трубы-заготовки. Он соответствует максимальному отклику в средней части эхограммы на первом отражении (см. рис. 7).

Таблица 2. Диапазон акустических характеристик распространения крутильной волны в трубах-заготовках на 3 этапах производства

Table 2. The range of acoustic characteristics of torsional wave propagation in billet pipes at 3 stages of production

Параметр	Этапы технологического цикла		
	состояние поставки	после отпуска	после правки
Затухание β , 1/км	7,1...12,9	4,4...11,7	5,5...9,8
Диапазон амплитуд 1-го донного импульса, мВ	44...125	12...144	61...147
Уровень акустического шума на участке перед 1-м отражением $R1$, дБ	-40,6...-31,3	-42,6...-30,8	-44,7...-33,5
Уровень акустического шума на участке от 7-го по 8-е отражения RN , дБ	-37,9...-26,5	-36,8...-23,3	-36,8...-26,4

Таблица 3. Акустические свойства труб-заготовок, забракованных на предприятии

Table 3. Acoustic properties of billet pipes rejected at the enterprise

№	Имя образца	Длина L , мм	Скорость C_t , м/с	Затухание β , 1/км	Уровень шума $R1$, дБ	Уровень шума RN , дБ
1	Брак 1 70 SA.mds	3362	3306	7,3	-35,1	-33,5
2	Брак 1 КА.mds	4278	3310	12,8	-44,4	-32,5
3	Брак 2 70 SA.mds	3363	3309	13,8	-39,4	-42,4
4	Брак 2 КА.mds	3364	3321	14,3	-33,6	-38,6
5	Брак 3 КА.mds	3364	3313	16,5	-33,0	-33,0
6	Брак 4 КА.mds	3199	3324	20,0	-37,3	-37,5
7	Брак 5 КА.mds	3364	3310	17,2	-34,1	-31,9
8	Брак 70 мм 4277	4277	3303	94,8	-15,8	-26,6

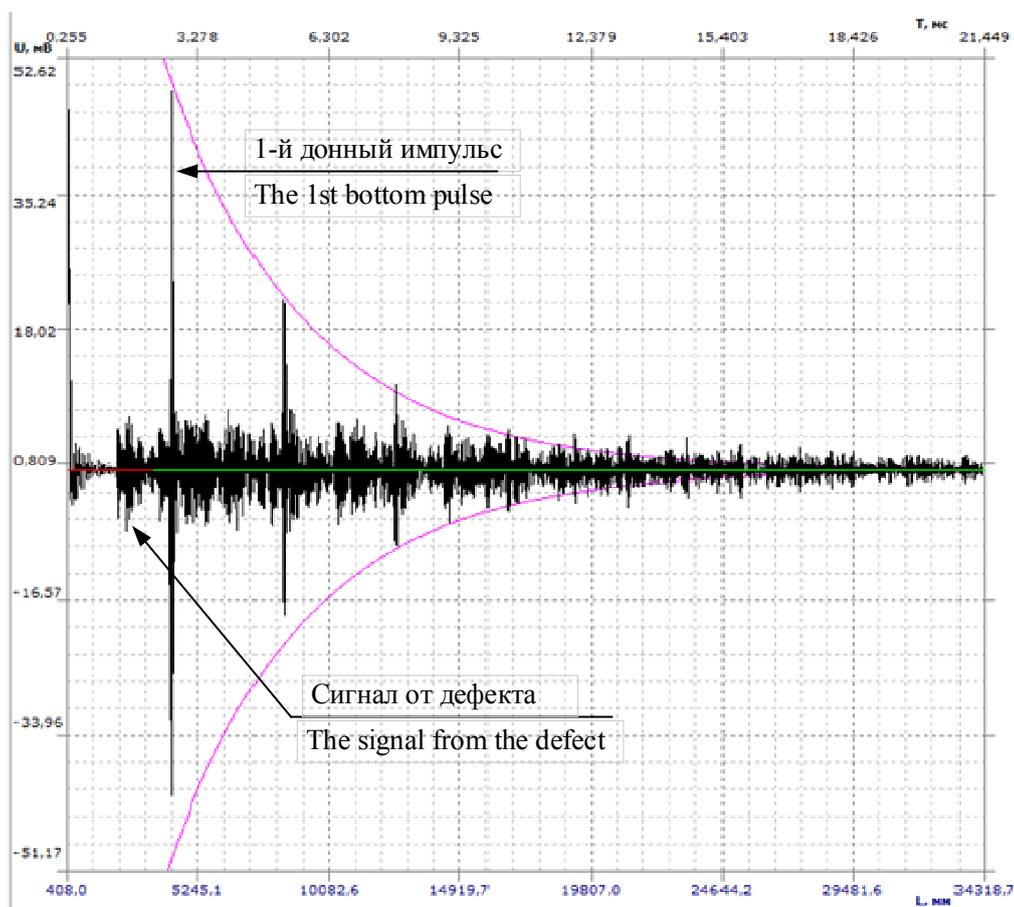


Рис. 7. Эхограмма прозвучивания забракованной трубы № 8 (звено 0)

Fig. 7. Echogram of the sounding of rejected pipe No. 8 (link 0)



Рис. 8. Дефект тела трубы № 8

Fig. 8. Defect in pipe body No. 8

Таким образом, волноводная методика, при которой акустический импульс генерируется и принимается с торца объекта контроля, позволяет построить эффективный входной контроль трубного проката при производстве ГШН. В качестве критериев браковки предлагается использовать: затухание β не более 13 км^{-1} , уровень акустического шума $R1$ не хуже минус 31 дБ и уровень RN не хуже минус 23 дБ.

Структуроскопия серийных образцов труб-заготовок в условиях цеха

Опробование волноводной методики произведено в условиях цеха на партии труб в количестве 32 шт. наружный диаметр 58 мм, длина 4279 ± 1 мм и толщина стенки 6,9 мм (ТУ 14-159-296–2004/35; ГОСТ 1050–2013). В процессе подготовки трубы подвергаются высокотемператур-

ному отпуску при температуре $580 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 ч с последующим выдерживанием 6 ч при температуре $400 \text{ }^\circ\text{C}$ и правке – механическому выравниванию с целью достижения прямолинейности. Отпуск направлен на получение оптимального соотношения между прочностью и вязкостью, повышение пластичности и гибкости, снижение хрупкости, удаление избыточной твердости, улучшение микроструктуры, снятие внутренних напряжений, повышение износостойкости на внешней и внутренней поверхности. У всех образцов произведено измерение параметров распространения крутильной и стержневой волны при установке преобразователей с каждой стороны трубы на 3 производственных этапах: состояние поставки, после отпуска, после правки (табл. 4).

Таблица 4. Средние значения параметров распространения крутильной волны в трубах-заготовках на 3 этапах производства

Table 4. Average values of parameters of torsional wave propagation in billet pipes at 3 production stages

Параметр	Этапы технологического цикла		
	состояние поставки	после отпуска	после правки
Среднее значение скорости крутильной волны C_t , м/с	3265	3291	3297
Стандартное отклонение скорости C_t в партии, м/с	3,3	4,1	3,8
Среднее значение скорости стержневой волны C_0 , м/с	4911	4967	4969
Стандартное отклонение по скорости C_0 в партии, м/с	5,1	5,6	7,0
Среднее расчетное значение модуля сдвига G , ГПа	82,2	83,5	83,8
Среднее расчетное значение модуля Юнга E , ГПа	186	190	190
Отношение средних значений скоростей C_0/C_t	1,504	1,509	1,507

Уровень акустического шума определен относительно амплитуды 1-го донного отражения (значения взяты по модулю). Модуль сдвига и модуль Юнга рассчитаны по среднему значению скорости волны в партии для табличного значения плотности 7710 кг/м^3 .

Существенно больший разброс по скорости стержневой волны C_0 обусловлен ее высокой дисперсией, что не позволяет использовать ее для поиска дефектов, оценки затухания и др. При

этом свойства крутильной волны C_t позволяют искать дефекты и оценивать свойства материала. Технологические операции по подготовке труб оказывают влияние на скорость крутильной волны (рис. 9). После операции отпуска значение скорости выросло в среднем на 26 м/с, а после правки – еще на 6 м/с. Таким образом, успешность технологических операций используемых при подготовке образцов может быть оценена на основе скорости крутильной волны C_t .

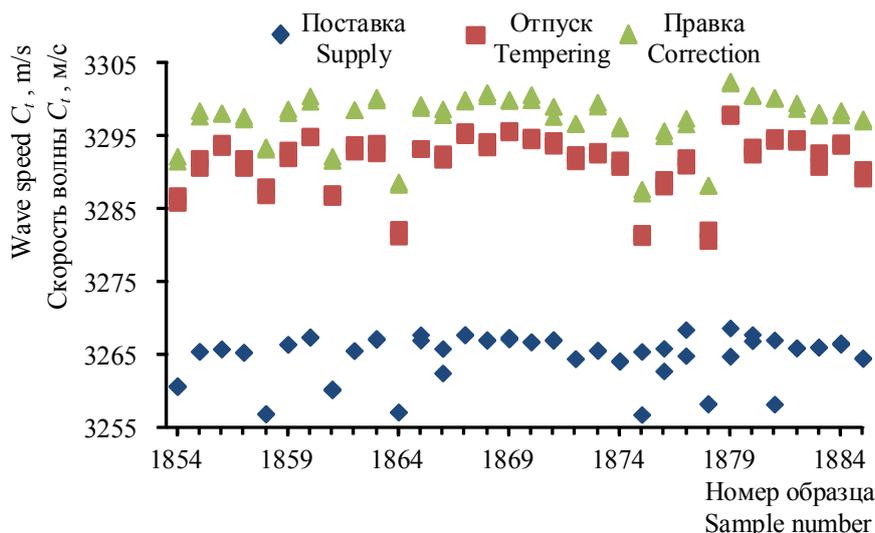


Рис. 9. Вариация скорости крутильной волны по образцам и ее изменение при подготовительных технологических операциях

Fig. 9. Variation of the torsional wave speed across samples and its change during preparatory technological operations

Оценка отклонения скорости крутильной волны в партии от среднего значения в группе выявила образцы, имеющие скорость крутильной волны на 5...10 м/с ниже среднего (№ 1858, № 1864, № 1875 и др.). Причем значения скорости, полученные с разных сторон трубы, как правило, близки или совпадают. Если в состоянии поставки таких образцов было 5 шт., после отпуска их количество уменьшилось до 3, и операция правки на эту особенность не повлияла. Так как на свойства готовой продукции отклонение по скорости не повлияло, то нижней границей годности труб-заготовок в состоянии поставки можно считать значение 3256 м/с, а нижней границей годности для труб-заготовок, прошедших термический отпуск, – значение 3280 м/с. В среднем по партии скорость крутильной волны выросла на 27 м/с. Увеличение скорости при высоком отпуске, вероятно, вызвано получением равновесных ферритно-перлитных структур материала и не противоречит результатам, полученным на других сталях [36, 37]. Контроль роста скорости крутильной волны до и после процедуры отпуска позволяет проконтролировать успешность данной технологической операции.

Волноводной методикой контроля труб-заготовок для ГШН целесообразно охватить всю номенклатуру труб на производстве. Из-за их большого разнообразия необходимо реализовать паспортизацию акустических свойств всех типоразмеров труб-заготовок, что влечет необходимость проведения постоянного входного

контроля поступающего трубного проката с оценкой вариации контролируемых параметров в зависимости от типоразмера и партии. Это позволит выявить корреляцию между акустическими характеристиками поступающей трубной продукции и браком, обнаруженным на финишном этапе производства.

На основе поступающей информации об отказах ГШН на территории заказчика и по причине обязательной цифровой маркировки каждого образца необходимо построение системы сквозного учета свойств образцов с последующим прогнозированием ресурса штангового насоса. На основании результатов входного контроля акустических свойств поступающих заготовок возможно построение цифрового образа готовой продукции.

Волноводная методика контроля позволяет оценить качество подготовительных мероприятий, проводимых с трубами-заготовками на этапах до нанесения ниппельной части или до изменения их профиля. Оценка изменения механических свойств трубного проката защитит технологию изготовления от вариаций, влияющих на конечное качество продукции.

Вывод

1. Опробование волноводной методики при организации сплошного входного контроля труб-заготовок глубинных штанговых насосов показало ее эффективность в задачах дефектоскопии и структуроскопии.

2. Использование крутильной волны при прозвучивании трубы с торца позволяет эффективно

обнаруживать нарушение сплошности вне зависимости от ее положения по сечению трубы.

3. Экспериментально получено отличие чувствительности к искусственному отражателю в виде присоединенной массы, расположенному на внешней и внутренней поверхности трубы диаметром 59,3 мм с толщиной стенки 14 мм. Амплитуда сигнала от искусственного отражателя в виде магнита на внешней поверхности трубы на 2 дБ больше, чем сигнал от отражателя, расположенного на внутренней поверхности.

4. Для выявления дефектных участков предложено оценивать амплитуды сигналы относительно амплитуды первого донного сигнала и определять максимальный уровень акустического шума минус 30,8 дБ соответствующий состоянию «годен».

5. Выявлен образец с критическим дефектом, расположенным в начале второй половины тела образца. Дефект подтвержден визуально. В цеховых условиях успешно многократно проконтролирована партия труб в количестве 32 шт. диаметром 58 мм и толщиной стенки 6,9 мм на этапах технологического цикла: поставка, отпуск, правка. Определена нижняя допустимая граница годности по скорости крутильной волны в 3255 м/с. Выявлено увеличение значений скоростей крутильной волны при процедуре отпуска в среднем по партии на 27 м/с, что позволяет осуществлять контроль используемой технологической операции.

Библиографические ссылки

1. Прогнозирование возникновения инцидентов на нагнетательных скважинах с использованием алгоритмов машинного обучения / Р. О. Мехоношин, Т. Ф. Вильданов, К. Е. Кордик, Е. В. Чернобровин, Р. Р. Ямлихин, И. А. Зинатуллин, А. В. Елизаров // Нефтепромысловое дело. 2023. № 9 (657). С. 16–21. DOI: 10.33285/0207-2351-2023-9(657)-16-21

2. Гупаленко Д. Д., Токарева С. А., Захаров Д. Ю. Разработка ключевых показателей эффективности деятельности управлений аварийно-восстановительных работ и капитального ремонта скважин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17, № 1. С. 74–80. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-74-80

3. Симченко О. Л., Ершова И. В., Чазов Е. Л. Управление эффективностью бизнес-процессов в капитальном ремонте скважин нефтедобывающего предприятия // Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика. 2023. Т. 25, № 4. С. 104–119. DOI: 10.15688/ek.jvolsu.2023.4.9

4. 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

5. Петров К. С., Петров В. В. Математическая модель функции чувствительности магнитоиндукционного датчика на основе астигматического подхода для идентификации дефектов поверхности катания колесных пар в процессе движения их над датчиком // Известия Транссиба. 2022. № 1(49). С. 111–122. EDN NZQUGW.

6. Суханов Д. Я., Совпель Е. С. Магнитоиндукционный интроскоп для дефектоскопии металлических объектов // Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 56–62. EDN SCKBHN.

7. Чуанлун В., Мэйсянь В., Дунли Ч. Вихретоковый датчик с двухчастотным возбуждением для обнаружения глубоких трещин // Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 65–72. DOI: 10.31857/S0130308220120076. EDN NOOQIE.

8. Применение вихретокового метода для выявления нарушений внутренней структуры в сталях / В. Н. Маликов, П. А. Шмыкова, С. Е. Кистаев [и др.] // Известия Тульского государственного университета Технические науки. 2023. № 9. С. 19–22. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-19-20. EDN HTDHLB.

9. Муравьева О. В., Брестер А. Ф., Муравьев В. В. Сравнительная чувствительность информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода на многократных отражениях при контроле пруткового проката // Дефектоскопия. 2022. № 8. С. 36–51. DOI: 10.31857/S0130308222080048. EDN BQEKGO.

10. Выявляемость дефектов муфт насосно-компрессорных труб магнитным, вихретоковым и ультразвуковым многократно-теневым методами контроля / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Синцов, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. 2022. № 4. С. 14–25. DOI: 10.31857/S0130308222040029. EDN BLAXOE.

11. Муравьева О. В., Мышкин Ю. В., Наговицын А. А. К вопросу о повышении эффективности проходного электромагнитно-акустического преобразователя продольных волн // Дефектоскопия. 2023. № 3. С. 3–13. DOI: 10.31857/S0130308223030016.

12. Акустические и электромагнитные свойства заготовок стволов гражданских ружей / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Т. Р. Вагапов, В. Е. Макарова, Е. А. Степанова // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 59–70. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-59-70.

13. Неразрушающий контроль : справочник / В. В. Клюев, В. Ф. Мужичкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин, В. Н. Филинов, А. А. Кеткович, М. В. Филинов, В. И. Матвеев. В 7 т. М. : Машиностроение, 2004. Т. 6. 832 с. ISBN 5-217-03238-3

14. Муравьева О. В., Ленков С. В., Мурашов С. А. Крутильные волны, возбуждаемые электромагнитно-акустическими преобразователями, при акустическом волноводном контроле трубопроводов // Акустический журнал. 2016. Т. 62, № 1. С. 117–124. DOI: 10.7868/S032079191506009X. EDN UWEIFB.

15. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов : монография / О. В. Му-

равьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин. Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения РАН, 2017. 234 с. ISBN 978-5-7692-1560-5

16. *Diogo A.R., Moreira B., Gouveia C.A.J., Tavares R.S.* (2022) A Review of Signal Processing Techniques for Ultrasonic Guided Wave Testing. *Metals*, vol. 12, no. 6, pp. 936. DOI: 10.3390/met12060936. EDN LLHMNG.

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

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

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

20. *Zang X., Xu Zh.D., Lu H., Zhu Ch, Zhang Zh.* (2023) Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 206, pp. 105133. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2023.105033

21. *Yung T.Ch., Pang J.S., Abdul M.N., Hamid L.E. Ooi, Tan W.H.* (2022) Ultrasonic guided wave testing on pipeline corrosion detection using torsional T(0,1) guided waves. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, pp. 9157-9166. DOI: 10.15282/jmes.16.4.2022.01.0725

22. Факторы, влияющие на эффективность возбуждения крутильных волн при волноводном контроле труб / О. В. Муравьева, С. В. Ленков, В. В. Муравьев, Ю. В. Мышкин, С. А. Мурашов // *Дефектоскопия*. 2016. № 2. С. 33–41. EDN VXMEDL.

23. *Olisa S.C., Khan M.A., Starr A.* (2021) Review of current guided wave ultrasonic testing (GWUT) limitations and future directions. *Sensors*, vol. 21, no. 3, pp. 1-28. DOI: 10.3390/s21030811. EDN BVCIYB.

24. Взаимодействие крутильных волн с продольными трещинами труб / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Д. В. Злобин, С. Мурашов А. // *Дефектоскопия*. 2006. № 6. С. 57–66. EDN HYJVKD.

25. *Vinogradov S, Cobb A, Fisher J.* (2018) New Magnetostrictive Transducer Designs for Emerging Application Areas of NDE. *Materials*, 11(5):755. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma11050755>

26. Исследование поврежденности образцов из стали 12X18H10T при малоциклового усталости методами неразрушающего контроля / А. А. Хлыбов, Ю. Г. Кабалдин, Д. А. Рябов, М. С. Аносов, Д. А. Шатагин // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2021. Т. 87, № 5. С. 61–67. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-5-61-67

27. *Серебряный В. Н., Мишакин В. В., Гончар А. В.* Акустические и рентгенографические параметры текстуры и константы упругости малоуглеродистой стали до и после усталостных испытаний // *Деформация и разрушение материалов*. 2020. № 2. С. 16–20. DOI: 10.31044/1814-4632-2020-2-16-20. EDN FNOMVX.

28. Реализация импульсного метода определения скорости ультразвука с высокой точностью / В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, Т. И. Земсков, Г. В. Безрученков, В. В. Сяктерева // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2021. Т. 19, № 2. С. 13–19. DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-13-19

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

30. *Муравьева О. В., Мурашов С. А.* Использование крутильных волн при выявлении эксплуатационных дефектов насосных штанг и насосно-компрессорных труб // *Вестник Ижевского государственного технического университета*. 2011. № 2 (50). С. 149–154. EDN NDKCSD.

31. Технология акустического волноводного контроля насосно-компрессорных труб / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин // *В мире неразрушающего контроля*. 2014. № 4(66). С. 55–60.

32. *Стрижак В. А.* Акустический контроль прутков композитной арматуры с учетом процента армирования // *Дефектоскопия*. 2022. № 10. С. 37–48. DOI: 10.31857/S0130308222100049. EDN BTDEBK.

33. *Стрижак В. А.* Искусственный отражатель для настройки дефектоскопа, реализующего акустический волноводный метод контроля композитной арматуры // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2020. Т. 23, № 2. С. 5–15. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-5-15

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

35. *Муравьева О. В., Злобин Д. В.* Акустический тракт метода многократных отражений при дефектоскопии линейно-протяженных объектов // *Дефектоскопия*. 2013. № 2. С. 43–51. EDN QJGKTJ.

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

37. Влияние термической обработки и структурного состояния стали 40X пруткового сортамента на скорость ультразвуковых волн и коэффициент Пуассона / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, А. Ф. Башарова [и др.] // *Сталь*. 2020. № 8. С. 63–68. EDN MKTWDN.

References

1. Mekhonoshin R.O., Vil'danov T.F., Kordik K.E., Chernobrovin E.V., Yamlikhin R.R., Zinatullin I.A., Elizarov A.V. (2023) [Prediction of incidents occurrence at injection wells using machine learning algorithms]. *Neftepromyslovoe delo*, no. 9, pp. 16-21 (in Russ.). DOI: 10.33285/0207-2351-2023-9(657)-16-21
2. Gupalenko D.D., Tokareva S.A., Zakharov D.Yu. (2021) [Development of key performance indicators for emergency recovery and well overhaul departments]. *Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekxy i sistemy*, vol. 17, no. 1, pp. 74-80. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-74-80 (in Russ.). EDN SWFFWT
3. Simchenko O.L., Ershova I.V., Chazov E.L. (2023) [Managing the efficiency of business processes in well workover of an oil-producing enterprise]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika*, vol. 25, no. 4, pp. 104-119 (in Russ.). DOI: 10.15688/ek.jvolsu.2023.4.9
4. Khomutov A.S., Muravyov V.V. (2023) [Flaw detection in the deep-rod pump cylinder after ion nitriding]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 21, no. 2, pp. 16-26 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-16-26
5. Petrov K.S., Petrov V.V. (2022) [Mathematical model of the sensitivity function of a magnetoinduction sensor based on the astigmatic approach to identify defects in the rolling surface of wheelsets in the process of moving them above the sensor]. *Izvestiya Transsiba*, no. 1, pp. 111-122 (in Russ.). EDN NZQUGW
6. Sukhanov D.Ya., Sovpel' E.S. (2015) [A magnetic-induction introscope for flaw detection of metal objects]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 51, no. 5, pp. 308-314. DOI: 10.1134/S1061830915050095. EDN UFCGCI
7. Chuanlun V., Meisyan' V., Dunli Ch. (2020) [An eddy current testing probe with dual-frequency excitation to detect deep cracks]. *Russian journal of nondestructive testing*, no. 12, pp. 65-72. DOI: 10.31857/S0130308220120076. EDN NOOQIE
8. Malikov V.N., Shmykova P.A., Kistaev S.E. (2023) [Application of the edge current method to detect imperfections in the internal structure in steel]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, no. 9, pp. 19-22. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-19-20 (in Russ.). EDN HTDHLB
9. Murav'eva O.V., Brester A.F., Murav'ev V.V. (2022) [Comparative sensitivity of informative parameters of the electromagnetic-acoustic mirror-shadow method on multiple reflections during the control of bar rolling]. *Russian journal of nondestructive testing*, no. 8, pp. 36-51. DOI: 10.31857/S0130308222080048. EDN BQEKGO
10. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Sintsov M.A., Volkova L.V. (2022) [Detecting flaws in pumping-compressor pipe couplings by magnetic, eddy current, and ultrasonic multiple-shadow testing methods]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 58, no. 4, pp. 248-258. DOI: 10.1134/S1061830922040088 EDN AKWOHF
11. Murav'eva O.V., Myshkin Yu.V., Nagovitsyn A.A. (2023) [On improving the efficiency of the pass-through electromagnetic-acoustic transducer of longitudinal waves]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 59, pp. 265-275 DOI: 10.1134/S1061830923700286
12. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Vagapov T.R., Makarova V.E., Stepanova E.A. (2023) [Acoustic and electromagnetic properties of blanks of barrels of civilian guns]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 21, no. 1, pp. 59-70. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-59-70 (in Russ.). EDN KBBVWG
13. Klyuyev V.V., Muzitsky V.F., Gorkunov E.S., Shcherbinin V.E., Filinov V.N., Ketkovich A.A., Filinov M.V., Matveev V.I. (2004) [Non-destructive testing]. Moscow: Mashinostroenie Publ., vol. 6, 832 p. ISBN 5-217-03238-3 (in Russ.). EDN QMDRSD
14. Murav'eva O.V., Len'kov S.V., Murashov S.A. (2016) [Torsional waves excited by electromagnetic acoustic transducers during acoustic waveguide control of pipelines]. *Physical foundations of engineering acoustics*, vol. 62, no. 1, pp. 117-124. DOI: 10.7868/S032079191506009X. EDN UWEWFB
15. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Strizhak V.A., Murashov S.A., Pryakhin A.V. (2017) *Akusticheskii volnovodnyi kontrol' lineino-protyazhennykh ob'ektov: monografiya* [Acoustic waveguide control of linearly extended objects] Novosibirsk: Izd-vo Sibirskogo otdeleniya RAN, 234 p. ISBN 978-5-7692-1560-5 (in Russ.). EDN YUHZJR
16. Diogo A.R., Moreira B., Gouveia C.A.J., Tavares R.S. (2022) A Review of Signal Processing Techniques for Ultrasonic Guided Wave Testing. *Metals*, vol. 12, no. 6, pp. 936. DOI: 10.3390/met12060936. EDN LLHMNG
17. Vinogradov S., Chen X., Cobb A., Fisher Ja. (2023) Applications of Linear Scanning Magnetostrictive Transducers (MST) for Finding Hard-to-Detect Anomalies in Structural Components. *Research and Review Journal of Nondestructive Testing*, vol. 1, no. 1. DOI: 10.58286/28141. EDN EGIHO
18. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Khasanov R.R., Mkrtchyan S.S. (2019) [Flaw detection of composite rebar by acoustic wave guided technique]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 22, no. 1, pp. 78-88. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-78-88 (in Russ.). EDN ZBAFKH
19. Strizhak V.A. (2023) [Stand for determining the dependence of the rod wave velocity on the temperature in metal bars]. *Kontrol'. Diagnostika*, vol. 26, no. 3, pp. 40-49. DOI: 10.14489/td.2023.03.pp.040-049 (in Russ.). EDN WMUCGO.
20. Zang X., Xu Zh. D., Lu H., Zhu Ch, Zhang Zh. (2023) Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 206, pp. 105133. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2023.105033
21. Yung T.Ch., Pang J.S., Abdul M.N., Hamid L.E. Ooi, Tan W.H. (2022) Ultrasonic guided wave testing on pipeline corrosion detection using torsional T(0,1) guided waves. *Journal of Mechanical Engineering and*

Sciences, pp. 9157-9166. DOI: 10.15282/jmes.16.4.2022.01.0725

22. Murav'eva O.V., Len'kov S.V., Murav'ev V.V., Myshkin Yu.V., Murashov S.A. (2016) [Factors that affect the excitation effectiveness of torsional waves during waveguide inspection of pipes]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no. 2, pp. 33-41. EDN VXMEDL

23. Olisa S.C., Khan M.A., Starr A. (2021) Review of current guided wave ultrasonic testing (GWUT) limitations and future directions. *Sensors*, vol. 21, no. 3, pp. 1-28. DOI: 10.3390/s21030811. EDN BVCYIB

24. Budenkov G.A., Nedzvetskaya O.V., Zlobin D.V., Murashov S.A. (2006) [Interaction of torsion waves with longitudinal cracks in tubes]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no. 6, pp. 57-66 EDN HYJVKD

25. Vinogradov S., Cobb A., Fisher J. (2018) New Magnetostrictive Transducer Designs for Emerging Application Areas of NDE. *Materials*, 11(5):755. <https://doi.org/10.3390/ma11050755>

26. Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A., Shatagin D.A. (2021) [Study of the damage to 12cr18ni10ti steel samples under low cycle fatigue using methods of nondestructive control]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, vol. 87, no. 5, pp. 61-67 (in Russ.). DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-5-61-672021

27. Serebryanyi V.N., Mishakin V.V., Gonchar A.V. (2020) [Acoustic and X-ray Diffraction Texture Parameters and the Elastic Constants of Low-Carbon Steel before and after Fatigue Tests]. *Deformaciya i razrushenie materialov*, vol. 2020, no. 10, pp. 1142-1146. DOI: 10.1134/S0036029520100225 (in Russ.). ISSN 0036-0295eISSN: 1555-6255.

28. Murav'ev V.V., Zlobin D.V., Zemskov T.I., Bezruchenkov G.V., Syaktereva V.V. (2021) [Reaction of pulse method for measurement of ultrasonic velocity with high accuracy]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 19, no. 2, pp. 13-1 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-13-19

29. Murav'ev V.V., Strizhak V.A., Khasanov R.R. (2016) [Features of software hardware complex for acoustic tensometry and structuroscopy of metal products]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, no. 2, pp. 71-75 (in Russ.). EDN WAXWNJ.

30. Murav'eva O.V., Murashov S.A. (2011) [Use of torsional waves for detection of operational defects in pump rods and tubing]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, no. 2 (50), pp. 149-154 (in Russ.). EDN NDKCSD.

31. Murav'eva O.V., Strizhak V.A., Zlobin D.V., Murashov S.A., Pryakhin A.V. (2014) [Technology of acoustic waveguide inspection of pumping and compression pipes]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, no. 4, pp. 55-60 (in Russ.). ISSN 1609-3178

32. Strizhak V.A. (2022) [Acoustic Testing of Composite Rebars Taking into Account Reinforcement Ratio]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 58, no. 10, pp. 891-902. DOI: 10.1134/S1061830922600836 (in Russ.). EDN ENJZNS.

33. Strizhak V.A. (2020) [Artificial reflector for setting up a flaw detector that implements an acoustic waveguide method for monitoring composite reinforcement]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, vol. 23, no. 2, pp. 5-15 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-5-15

34. Murav'eva O.V., Shikharev P.A., Murashov S.A. (2024) [Propagation of guided acoustic waves in the shafts of centrifugal pumps with longitudinal cracks of axial holes]. *Kontrol'. Diagnostika*, vol. 27, no. 1, pp. 14-29 (in Russ.). DOI: 10.14489/td.2024.01.pp.014-029

35. Murav'eva O.V., Zlobin D.V. (2013) [The acoustic path in the method of multiple reflections during nondestructive testing of linearly extended objects]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 49, no. 2, pp. 93-99 (in Russ.). DOI: 10.1134/S1061830913020058

36. Murav'ev V.V., Budrin A.Y., Sintsov M.A. (2020) [Structuroscopy of heat-treated steel bars by the speed of propagation of rayleigh waves]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 18, no. 2, pp. 37-43. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43 (in Russ.). EDN VGDDFW

37. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Basharova A.F. (2020) [Thermal treatment effect and structural state of rod-shaped assortment 40kh steel on the speed of ultrasound waves and poisson coefficient]. *Steel in Translation*, vol. 50, no. 8, pp. 579-584. DOI: 10.3103/S0967091220080082 (in Russ.). EDN OEUYJS

Waveguide Acoustic Control of Pipes – Billets of Deep Rod Pumps

V.A. Strizhak, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

R.R. Khasanov, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.S. Khomutov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

K.A. Torkhov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

P.N. Pushin, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Deep rod pumps are expensive maintenance-free equipment for extracting oil from wells. The exclusion of defective billet pipes from the technological cycle of manufacturing elements of such pumps significantly affects both the cost of their production and the cost of production. A waveguide method is proposed for continuous input testing of tube billets of rod pump cylinders. It does not require scanning and is highly sensitive to both internal and surface defects. An experimental assessment of the sensitivity of the method to defects in the form of an influx located on the outer and inner surfaces of a thick-walled pipe with a diameter of 59.3 mm and a wall thickness of 14 mm was carried out. The echo signal from the artificial reflector decreased by 2 dB when the reflector was moved from the outside of

the pipe to the inside. The criteria for rejection of the blank pipe are determined by the signal level at the first reflection $R1$, at the 8th reflection RN and by the attenuation coefficient β . As a result of flaw detection of billet pipes, a pipe with a significant defect was found. An experimental study of the acoustic properties of a batch of pipes with a diameter of 58 mm in the delivery state was carried out. For the billets of the cylinder of the deep rod pump in the delivery state, the lower acceptance limit for the torsional wave velocity of 3255 m/s has been determined. The influence of technological operations of high tempering and straightening on their acoustic properties is estimated. The possibility of quality control when performing the release operation by the guided wave method is shown. It was revealed that during the tempering procedure, the velocity of the torsional wave increases, on average, by 27 m/s per batch.

Keywords: deep well pump, waveguide acoustic testing, torsional waves, rod waves, tubular blanks.

Получено 24.05.2024

Образец цитирования

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, К. А. Торхов, П. Н. Пушин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 3. С. 86–100. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100

For Citation

Strizhak V.A., Khasanov R.R., Khomutov A.S., Torkhov K.A., Pushin P.N. (2024) [Waveguide acoustic control of pipes – billets of deep rod pumps]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2024, vol. 27, no. 3, pp. 86-100 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100