

15. *Ambartsumyan S.A.* Raznomodul'naya teoriya uprugosti [Heterogeneous theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1982, 317 p.
16. *Nazarov V.E., Ostrovskiy L.A.* Issledovanie anomal'noy akusticheskoy nelineynosti v metallakh [The study of anomalous acoustic nonlinearity in metals], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskij zhurnal], 1988, Vol. 34, Issue 3, pp. 491-499.
17. *Zagray N.P.* Nelineynye vzaimodeystviya v sloistykh i neodnorodnykh sredakh: monografiya [Nonlinear interaction in layered and inhomogeneous media: monograph]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 433 p.
18. *Zagray N.P.* O vydelenii nelineynykh dobavok tret'ego priblizheniya [On the allocation of the nonlinear third-order additives], *Materialy nauchnoy konferentsii «Sessiya Nauchnogo Soveta RAN po akustike i KhKhV sessiya RAO», 17–20 sentyabrya 2012 g.* [Materials of scientific conference "Session of Scientific Council of Russian Academy of science on acoustics and XXV session of the RAO", 17-20 September 2012], Parte 2. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2012, 63 p.
19. *Rudenko O.V.* Osnovy fiziki intensivnykh akusticheskikh voln. V kn.: Nelineynye volny-2004 [Physics of intense acoustic waves. In the book: Nonlinear waves-2004]. Nizhniy Novgorod: IPF RAN, 2005, pp. 70-88.
20. *Shirgina N.V.* Diagnostika uprugikh granulirovannykh nekonsolidirovannykh sred metodami nelineynoy akustiki: avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk [Diagnostics of elastic granular unconsolidated media IU-methods of nonlinear acoustics: abstract cand. of phis.-math. sc. diss.]. Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova, 2013, 4 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.м.-н., профессор А.И. Жорник.

Заграй Николай Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: znp@sfned.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634379879; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Михралиева Амалия Исмиевна – кафедра электрогидроакустики и медицинской техники; аспирантка.

Строчан Тимур Петрович – кафедра электрогидроакустики и медицинской техники; аспирант.

Zagray Nikolay Petrovitch – Southern Federal University; e-mail: znp@sfned.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634379879; the department of hydroacoustic and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

Mikhralievna Amalia Ismiyevna – the department of electrical underwater acoustics and medical technology; postgraduate student.

Strochan Timur Petrovich – the department of electrical underwater acoustics and medical technology; postgraduate student.

УДК 620.179.16

А.Н. Иванов, В.И. Тимошенко

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ШАГА СКАНИРОВАНИЯ ПО СПИРАЛИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ ТРУБ НА ОАО «ТАГМЕТ»

Рассматривается иммерсионный метод прозвучивания бесшовных труб продольного сканирования поперечными волнами, распространяющимися в ее стенке по зигзагообразной траектории перпендикулярно образующей. Приведен метод аналитического расчета шага сканирования с учетом соотношения ширины зоны перекрытия при сканировании, ширины пьезоэлектрического преобразователя и плотности потока зондирующих импульсов. Определена ширина преобразователя и вычислено время прохождения луча ультразвукового

колебания от преобразователя до дефектов в трубе. Оптимизирована величина шага сканирования и установлена максимальная производительность линий контроля. Правильный выбор соотношений ширины поля пьезоэлектрического преобразователя, ширины зоны перекрытия при сканировании и размерами минимально допустимого дефекта позволил более качественно настраивать чувствительность преобразователей, и повысить достоверность контроля, достигая наивысшей на рынке производительности и соответствовать современным мировым требованиям и стандартам. Для высокой надежности использован уточненный расчет шага и скорости сканирования, как функции от длины преобразователя, длины искусственного дефекта и плотности потока зондирующих импульсов, позволяющий оптимизировать величину этих параметров и установить максимальную производительность линий контроля. Выявлено, что величина шага сканирования поверхности трубы зависит от диаметра трубы и угла разворота колес рольганга, где при увеличении диаметра трубы или угла разворота колёс рольганга шаг сканирования увеличивается. Рассмотрено, что при движении трубы с искусственным отражателем (риской) возможны различные ситуации пересечения поля пьезоэлектрического преобразователя. Вычислен шаг сканирования и длина пересечения риски поля преобразователя, а также условия полного попадания риски в поле преобразователя. Показан план охвата трубы ультразвуковым контролем с использованием восьмиканальной кассеты с пьезоэлектрическими преобразователями длиной 12,5 мм. Каждый, в количестве восьми штук. Величина шага сканирования определена эффективной шириной пучка ультразвукового поля датчика, которая равна расстоянию над поверхностью трубы между положениями преобразователя, при которых эхо-сигнал от заданного минимального контрольного отражателя уменьшается до установленного уровня амплитуды срабатывания дефекта. Показан план сканирования трубы и ввод ультразвуковых колебаний в металл. Определена ширина преобразователя и схема угла ввода ультразвуковых колебаний из воды в сталь при контроле иммерсионным способом. Определены условия оптимального выявления дефектов, расположенных по всему сечению трубы, время прохождения луча ультразвукового колебания от преобразователя до дефектов в трубе и какая необходима при этих условиях частота и амплитуда повторения зондирующих импульсов. Выбран расчёт надёжного выявления, заданного минимального контрольного отражателя в контролируемой трубе при максимальной производительности контроля. При контроле труб важными параметрами являются соотношения ширины зоны перекрытия при сканировании, ширины пьезоэлектрического преобразователя и плотность потока зондирующих импульсов. Величина шага сканирования определена параметрами преобразователя, размерами минимально допустимого дефекта и характеристиками транспортной системы установки обеспечивая 100 % охват поверхности контролируемой трубы.

Ультразвуковой контроль труб; пьезоэлектрические преобразователи; шаг сканирования; искусственный дефект.

A.N. Ivanov, V.I. Timoshenko

THE CHOICE OF OPTIMAL STEP OF SCANNING IN A SPIRAL DURING AUTOMATED ULTRASONIC CONTROL OF PIPES ON PJSC "TAGMET"

This article describes the immersion method of ultrasonic seamless pipes longitudinal scan transverse waves propagating in the wall of the the curves are perpendicular. The method of analytical calculation of step scanning with a given ratio width of the overlap area during scanning, the width of the piezoelectric transducer and the flux density of the probing pulse. The width of the Converter is defined and calculated through-beam ultrasonic vibrations from the transducer to the defect in the pipe. Optimized the step size of scanning and set the maximum performance of a control line. Proper selection of the ratios of the width of the piezoelectric transducer, the width of the zone of overlap during scanning and the size of the minimum defect to better adjust the sensitivity of the transducers, and to improve the reliability of control, reaching higher market performance and correspond to modern international requirements and standards. For high reliability used updated calculation step and the scanning speed, as a function of the length of the transducer, the length of the artificial defect and the flux density of the probe pulse, which allows to optimize the magnitude of these parameters and set the maximum performance of a control line. It was revealed that the size of

a step of scanning the surface of the pipe depends on the pipe diameter and the angle of turn of the wheels of the roller conveyor, where the increase in pipe diameter or angle of turn of the wheels of the roller conveyor, the step of scanning is increased. Considered that the motion of the pipe with an artificial reflector (scored) possible different situations of intersection of the fields of the piezoelectric transducer. The computed step size and the length of the intersection line field transmitter, as well as the conditions of complete penetration risks in the field Converter. Shows the reach of pipe ultrasonic testing using an eight-channel cassette with piezoelectric transducers with a length of 12.5mm. each, in the amount of eight pieces. The step size of the effective scanning width of the beam of ultrasonic field sensor that is equal to the distance above the surface of the pipe between the provisions of the transducer at which the echo signal from a given minimal control of the reflector is reduced to a fixed level amplitude triggering the defect. Shows the scan of the pipe and the ultrasonic wave in the metal. Defined width Converter circuit and the angle of the ultrasonic wave from water into steel during the control immersion. The conditions for the optimal detection of defects located throughout the section of the pipe, the through-beam ultrasonic vibrations from the transducer to the defect in the pipe and what is required under these conditions, the frequency and amplitude of pulse repetition. Selected calculation of reliable detection, the minimum control in a controlled reflector tube for maximum performance control. In the control tubes important parameters are the ratio of the width of the zone of overlap during scanning, the width of the piezoelectric transducer and the flux density of the probing pulses. The magnitude of the scan step is determined by the Converter parameters, the minimum allowable size of the defect and characteristics of the transport system installation ensuring 100 % coverage of the surface of the testing pipe.

Ultrasonic inspection of tubes; piezoelectric transducers; scanning pitch; an artificial defect.

Введение. В последнее время появилась тенденция к ужесточению требований к ультразвуковому контролю бесшовных труб [1]. И одна из основных задач неразрушающего контроля удовлетворить требования современных стандартов трубного производства, повысить качество и достоверность проведения ультразвукового контроля труб, обеспечить высокую повторяемость и надежность в условиях высокоскоростного промышленного производства [2]. Однако даже положительные результаты неразрушающего контроля не следует рассматривать как гарантию выполнения требований к продукции в части отсутствия дефектов.

Нарушение действующих стандартов трубного производства может привести к аварии на буровой установке или магистральном трубопроводе, тем самым нанесая вред природе и экологической обстановке в целом.

Постановка задачи. Для повышения качества контроля труб необходимо оптимизировать следующие характеристики установок ультразвуковой дефектоскопии: ширины зоны перекрытия при сканировании, плотности потока зондирующих импульсов, время прохождения луча ультразвукового колебания, шага и скорости сканирования, ширины и длины пьезоэлектрического преобразователя, длины искусственного дефекта, диаметра трубы, угла разворота колес рольганга, частоты и амплитуды повторения зондирующих импульсов. Данная статья позволяет решить эти вопросы.

Рассмотрим ультразвуковую установку «ДЭКОТ» на ОАО «Тагмет», в основу которой положен ультразвуковой эхо-импульсный иммерсионный метод [3]. Контактная жидкость – питьевая вода. Один из основных методов прозвучивания бесшовных труб при автоматизированном ультразвуковом неразрушающем контроле с использованием пьезоэлектрических преобразователей на ОАО «Тагмет», является метод продольного сканирования трубы поперечными волнами, распространяющимися в ее стенке по зигзагообразной траектории перпендикулярно образующей, с установленной определенной скоростью. При реализации метода ультразвукового неразрушающего контроля с продольным сканированием трубы необходимо выполнить расчеты ряда параметров траектории распространения ультразвуковых импульсных сигналов, в стенке трубы, определяющих основные технические характеристики метода [4]:

- ◆ время, затрачиваемое на получение одного импульса от дефекта, определяющее частоту следования зондирующих сигналов;
- ◆ максимально допустимую скорость контроля;
- ◆ шаг сканирования трубы.

Механическая часть состоит из колёсных рольгангов, обеспечивающие винтовое движение трубы с определенным шагом и системы ориентации датчиков, которая удерживает постоянный угол ввода ультразвуковых колебаний в тело трубы. Сканирование происходит автоматически по спирали, труба загружается на транспортный входной рольганг и при вращательно-поступательном движении с установленной скоростью подается в зону контроля [3]. При контроле труб важными параметрами являются соотношения ширины зоны перекрытия при сканировании, ширины пьезоэлектрического преобразователя и плотность потока зондирующих импульсов. Величина шага сканирования определяется параметрами преобразователя, размерами минимально допустимого дефекта и характеристиками транспортной системы установки обеспечивая **100 %** охват поверхности контролируемой трубы.

Для перекрытия шага движения трубы и отвечая современным стандартам и мировым требованиям к неразрушающему контролю, в акустической части установки установлены две восьмиканальные кассеты с пьезоэлектрическими преобразователями каждый из которых длиной **12,5 мм**, и кассета толщиномера с шестнадцатью пьезоэлектрическими преобразователями цилиндрической формы, размер каждого **6мм**. Эти преобразователи необходимы для обнаружения дефектов в виде продольных рисок на внутренней и наружной поверхности трубы длиной в **1''**, а также для выявления плоскостных отверстий **Ø3,2 мм**, расслоения металла и измерения толщины стенки. Конструктивно преобразователи помещены в локальную иммерсионную ванну, которая укреплена на раме к системе ориентации.

Под шагом сканирования при поступательно-вращательном движении трубы мы понимаем расстояние, проходящее трубой за один оборот и определяем угол разворота роликов колесного рольганга φ (рис. 1).

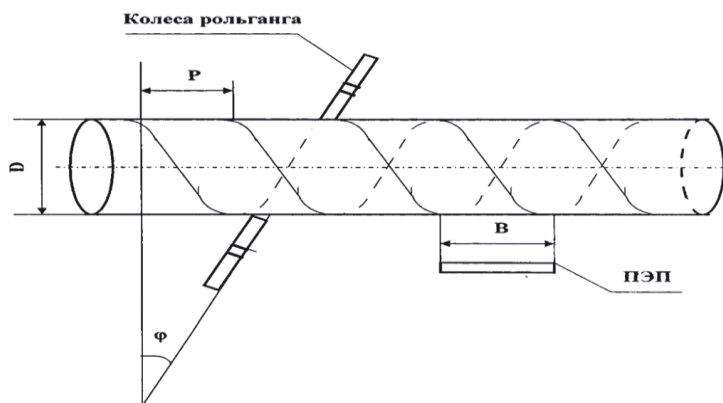


Рис. 1. Шаг сканирования поверхности трубы

Величина шага сканирования зависит от диаметра трубы и угла разворота колес рольганга, где при увеличении диаметра трубы или угла разворота колес рольганга шаг сканирования увеличивается.

Шаг сканирования P вычисляется формулой [5]:

$$P = S \times \operatorname{tg} \varphi = \pi \times D \times \operatorname{tg} \varphi,$$

где P – шаг сканирования; S – длина окружности трубы; D – диаметр трубы; φ – угол разворота роликов колёсного рольганга.

Следовательно, для обеспечения стопроцентного перекрытия всей поверхности трубы, ширина луча преобразователя « B » не должна быть меньше « P ». Необходимо выполнить условие:

$$B \geq P \geq \pi \times D \times \operatorname{tg} \varphi.$$

От установленного шага сканирования зависит надежность результата контроля и производительность. Выбираться он должен из расчёта надёжного выявления, заданного минимального контрольного отражателя в контролируемой трубе при максимальной производительности контроля (стандартный рольганг имеет угол разворота роликов $\varphi \approx 8^\circ$).

Теперь рассмотрим один из важных факторов, который влияет на контроль в целом – это *искусственный отражатель*. Для настройки чувствительности используют искусственные отражатели в виде прямоугольных рисков определённой длины, ширины и глубины. При движении трубы с искусственным отражателем (риской) возможны различные ситуации пересечения поля пьезоэлектрического преобразователя (рис. 2).

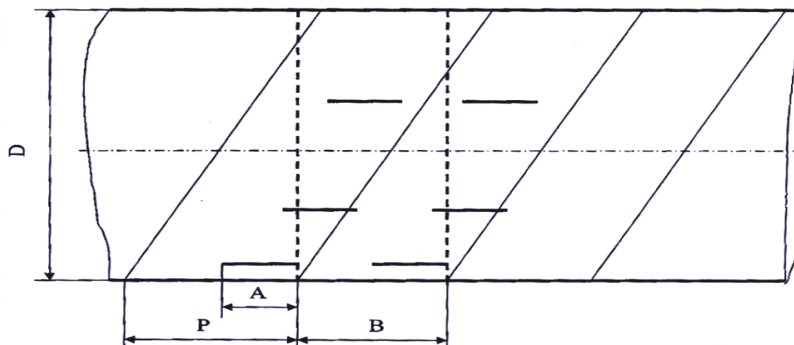


Рис. 2. Варианты пересечения рискной поля преобразователя.

Длина пересечения рискной поля преобразователя выражается формулой [6]:

$$L = \frac{A + B - P}{2},$$

где L – Длина пересечения рискной поля преобразователя; P – шаг сканирования; A – длина риски; B – ширина поля преобразователя.

Условием полного попадания риски в поле преобразователя:

$$P = B - A.$$

По современным и мировым стандартам выдвинуто одно из требований – выявление риски длиной I'' глубиной 5 % от толщины стенки.

Следовательно, для максимального шага сканирования и 100 % подтверждения испытательного образца с рискной I'' необходимо, чтобы выполнялось условие полного попадания риски в поле преобразователя:

$$P = 100 - 25 = 75 \text{ мм},$$

где $B=100 \text{ мм}$ – длина восьмиканальной кассеты с преобразователями, где каждый преобразователь длиной 12,5мм; $A=25 \text{ мм}$ – длина искусственного дефекта – 1" (прямоугольная риска).

$$L = \frac{25 + 100 - 75}{2} = 25 \text{ мм.}$$

Длина области пересечения риской поля преобразователя равна длине искусственного дефекта: $L=A=25 \text{ мм.}$, при этих данных искусственный дефект при любых положениях трубы попадает в ширину поля преобразователя.

Для перекрытия шага сканирования трубы и отвечая современным стандартам и мировым требованиям к неразрушающему контролю, в акустической части установки устанавливаем две восьмиканальные кассеты с пьезоэлектрическими преобразователями каждый из которых длиной $12,5 \text{ мм}$, и кассету толщиномера с шестнадцатью пьезоэлектрическими преобразователями цилиндрической формы, размер каждого 6 мм . Эти преобразователи необходимы для обнаружения дефектов в виде продольных рисок на внутренней и наружной поверхности трубы длиной в $1''$, а также для выявления плоскостных отверстий $\varnothing 3,2 \text{ мм}$, расслоения металла и измерения толщины стенки. Конструктивно преобразователи помещены в локальную иммерсионную ванну, которая укреплена на раме к системе ориентации. Выбираем длину кассеты 100 мм , состоящую из восьми преобразователей длиной по $12,5 \text{ мм}$, что позволяет выполнить условие и обеспечить контроль всей поверхности трубы для труб с диаметром 273 мм и ниже.

На рис. 3 показан план охвата трубы ультразвуковым контролем с использованием восьмиканальной кассеты с пьезоэлектрическими преобразователями длиной $12,5 \text{ мм}$ каждый, в количестве восьми штук.

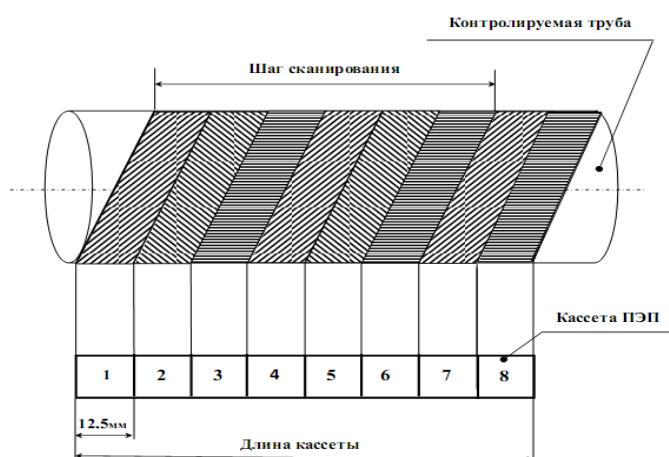


Рис. 3. План сканирования трубы

Величина шага сканирования определяется эффективной шириной пучка ультразвукового поля датчика, которая равна расстоянию над поверхностью трубы между положениями преобразователя, при которых эхо-сигнал от заданного минимального контрольного отражателя уменьшается до установленного уровня амплитуды срабатывания дефекта. Сигнал от дефекта, расположенного в дальней зоне датчика, зависит от характеристики направленности излучателя с учётом направленности отражения от дефекта; размера излучателя и дефекта; расстояния от дефекта вдоль оси датчика и от дефекта до акустической оси датчика.

При иммерсионном способе ввода ультразвуковых колебаний датчик отделен от поверхности трубы слоем жидкости. Величина слоя жидкости выбрана равной протяженности ближней зоны излучателя, но не меньше $1/4$ от толщины контролируемой трубы. Из структуры ультразвукового поля видно, что наиболее крити-

ческая ширина поля находится вблизи поверхности ввода ультразвуковых колебаний. На основании этого следует при настройке установки производить настройку чувствительности по контрольному отражателю, залегающему на максимальной глубине трубы, а шаг и скорость сканирования настраивать по такому же контрольному отражателю, но залегающему на минимальной глубине выявления дефектов.

С увеличением расстояния между поверхностью ввода ультразвуковых колебаний и датчиком за счет расхождения ультразвукового пучка увеличивается его эффективная ширина. Таким образом, с увеличением слоя жидкости повышается надежность результатов контроля и появляется возможность увеличения шага сканирования. Однако с увеличением слоя жидкости увеличивается поглощение ультразвуковых колебаний, и резко возрастают требования к максимально допустимому отклонению от нормали луча, падающего на поверхность ввода ультразвуковых колебаний, особенно для труб большой толщины.

Определим ширину преобразователя. На рис. 4 показан ввод ультразвуковых колебаний в металл.

Расстояние от оси трубы до центра излучателя для обеспечения требуемого угла ввода (H) определяется уравнением [7]:

$$H = \frac{D}{2} \sin \alpha,$$

где $D=2R$ – диаметр трубы; R – радиус трубы; α – угол ввода ультразвуковых колебаний на границу из жидкости в сталь.

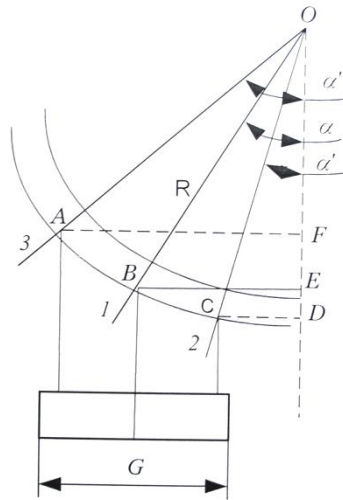


Рис. 4. Схема ввода ультразвуковых колебаний при контроле иммерсионным способом

Для получения сдвиговой ультразвуковой волны в металле, угол ввода ультразвуковых колебаний из воды в сталь должен лежать в пределах: $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$, где α_1 – критический угол для продольной волны; α_2 – критический угол для сдвиговой волны. Исходя из условий оптимального выявления дефектов, расположенных по всему сечению трубы: $15^\circ < \alpha < 27^\circ$, где $\gamma t = 45^\circ$.

Угол ввода ультразвуковых колебаний из воды в сталь выражается уравнением [6]:

$$\alpha = \arcsin \frac{C_m}{C_t} \times \sin \gamma t = \arcsin \frac{1480}{3240} \times \sin 45^\circ = 20^\circ,$$

где C_m – скорость распространения звука в жидкости; C_t – скорость распространения сдвиговых волн в металле; γt – угол сдвиговой волны.

Вследствие кривизны поверхности трубы ультразвуковой пучок, излученный крайними точками пьезоэлектрического преобразователя, падает на поверхность трубы под углами α' и α'' , отличными от α . Поэтому необходимо выбирать такую ширину преобразователя (G), чтобы крайние лучи не возбуждали в трубе продольной и поверхностной волны [7].

$$\alpha' = \arcsin \frac{H - \frac{G}{2}}{\frac{D}{2}}, \quad \alpha'' = \arcsin \frac{H + \frac{G}{2}}{\frac{D}{2}};$$

Для устранения возникновения в трубе продольных волн, должно выполняться следующее условие: $\alpha - \alpha 1 \geq \alpha - \alpha'$, или $\alpha' \geq \alpha 1$:

$$\arcsin \frac{H - \frac{G}{2}}{\frac{D}{2}} \geq \arcsin \frac{C_m}{C_e},$$

где C_e – скорость распространения продольных волн в металле; γe – угол продольной волны; $\alpha 1: \gamma e = 90^\circ$, т.е. происходит полное внутреннее отражение продольной волны и в металле распространяется только сдвиговая волна.

Вводя угол γt образуемый поперечной волной в стенке трубы с нормалью к поверхности трубы, и учитывая, что

$$\sin \gamma t = \sin \alpha \frac{C_t}{C_m};$$

В результате преобразований получим:

$$G \leq D \left(\sin \alpha - \frac{C_m}{C_t} \right) \leq D \frac{C_m}{C_e} \left(\frac{C_e}{C_t} \sin \gamma t - 1 \right). \quad (1)$$

Для устранения возникновения поверхностных волн в трубе, должно выполняться условие: $\alpha 2 - \alpha \geq \alpha'' - \alpha$, или $\alpha 2 \geq \alpha''$:

$$\arcsin \frac{C_m}{C_t} \geq \arcsin \frac{H + \frac{G}{2}}{\frac{D}{2}};$$

$\alpha 2: \gamma t = 90^\circ$, т.е. происходит полное внутреннее отражение поперечной волны и в металле распространяется только поверхностная волна.

В результате преобразований получим:

$$G \leq D \frac{C_m}{C_t} (1 - \sin \gamma t). \quad (2)$$

Для труб диаметром от **73** до **273 мм** из приведенных выше условий, ширина преобразователя не должна превосходить **10 мм**. Для обеспечения прозвучивания всего сечения стенки трубы при толщинах стенки от **5** до **30 мм** выбираем ширину преобразователя равной **10 мм**.

В процедурах контроля фирмы «Еххон Mobil» заложено требование, что расстояние между двумя зондирующими импульсами (расстояние между двумя измерениями) должно быть не более **1мм**. В системе «ДЭКOT» период повторения

зондирующих импульсов **1 мсек**. (частота повторения **1 кГц**), максимальное время развертки **180 мсек** и время от зондирующего импульса до начала развертки **120 мсек**. Для больших диаметров труб расстояние между двумя измерениями может превышать **1 мм**. Уменьшение этого расстояния повышает количество измерений за единицу времени и повышает достоверность контроля. Опыт эксплуатации показал, что при **5 %** допусках на величину дефектов необходимо повышать соотношение сигнал/шум. Этого можно добиться увеличением амплитуды зондирующих импульсов. В системе «ДЭКОТ» амплитуда зондирующих импульсов задана **200 В**.

Время прохождения луча ультразвукового колебания от преобразователя до дефектов в трубе можно определить выражением [8]:

$$t = \frac{2Lm}{Cm} + \frac{4Lt}{Ct},$$

где t – время прохождения луча ультразвукового колебания, $Lm \approx 30$ мм – длина пути луча ультразвукового колебания, $Cm = 1480$ м/сек – скорость распространения звука в воде, $Lt \approx 30$ мм – длина пути луча ультразвукового колебания от наружной до внутренней стенки трубы, $Ct = 3240$ м/сек – скорость распространения сдвиговой волны в трубе.

$$t = \frac{2 \times 0,03}{1480} + \frac{4 \times 0,03}{3240} = 80 \text{ мсек}.$$

Необходимо при этих условиях частоту повторения зондирующих импульсов увеличить до **3 кГц**, амплитуду до **180–200 В**.

Выводы:

1. Для обеспечения эффективного и надежного ультразвукового контроля труб и обнаружения дефектов (риски) длиной **1''** и плоскодонных отверстий **Ø3,2 мм** для диаметров от **73 до 273 мм** с толщиной стенки от **5 до 30 мм**, используем две восьмиканальные каскеты, расположенные друг против друга с пьезоэлектрическими преобразователями длиной **12,5 мм** и шириной **10 мм** каждый, работающих на частоте **2,5 МГц**, и толщиной с шестнадцатую пьезоэлектрическими преобразователями цилиндрической формы, размер каждого **6 мм**, работающих на частоте **5,0 МГц** и из расчетов выбран шаг оптимального сканирования **75 мм**.
2. Для высокой надежности целесообразно использовать уточненный расчет шага и скорости сканирования, как функции от длины преобразователя, длины искусственного дефекта и плотности потока зондирующих импульсов, позволяющий оптимизировать величину этих параметров и установить максимальную производительность линий контроля.
3. Правильный выбор соотношений ширины поля пьезоэлектрического преобразователя, ширины зоны перекрытия при сканировании и размерами минимально допустимого дефекта позволил более качественно настраивать чувствительность преобразователей, и повысить достоверность контроля, достигая наивысшей на рынке производительности и соответствовать современным мировым требованиям и стандартам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стандарт ANSI/API Specification SDP/ISO 11961: Требования к бурильным трубам, 2008.
2. Ринкевич А.Б., Смородинский Я.Г. Анализ параметров и технических характеристик современных ультразвуковых дефектоскопов общего назначения // Дефектоскопия. – 2002. – № 9.

3. Патент РФ на изобретение №2351925. Способ автоматизированного неразрушающего контроля качества труб и устройство для его осуществления / *Мульчин В.В., Фартушный Р.Н., Ясаев Р.А., Козьев В.Г. и др.* Бюл. № 10, 2009.
4. Неразрушающие испытания: справочник. Кн. 2 / под ред. Р. МАК-МАСТЕРА. – М.: Изд-во «Энергия», 1965. – 504 с.
5. *Крауткремер Й., Крауткремер Г.* Ультразвуковой контроль металлов: справочник. – М.: Metallurgiya, 1991. – 752 с.
6. *Шрайбер Д.С.* Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Metallurgiya, 1965. – 416 с.
7. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под общей ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2003.
8. *Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.* Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
9. ГОСТ 17410-78. Контроль неразрушающий. Трубы металлические бесшовные цилиндрические. Методы ультразвуковой дефектоскопии.
10. *Щербинский В.Г., Самедов Я.Ю., Артемьев С.А.* Автоматизированные установки для контроля прокатных влков // Дефектоскопия. – 2004. – № 6.
11. *Выборнов Б.И.* Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Metallurgiya, 1985. – 256 с.
12. *Ланге Ю.В., Воронков В.А.* Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения: справочник. – 2-е изд. – М., 2003.
13. *Ермолов И.Н., Ермолов М.И.* Ультразвуковой контроль: учебник для специалистов 1 и 2 уровней квалификации. – 5-е изд. – М., 2003.
14. *Ермолов И.Н., Алишин Н.П., Потапов А.И.* Неразрушающий контроль. Кн. 2. Акустические методы контроля. – М.: Высшая школа, 1991. – 283 с.
15. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
16. Теория и практика ультразвукового контроля / под ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
17. *Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.* Неразрушающий контроль: справочник / под ред. В.В. Ключева. Т. 3. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
18. *Ермолов И.Н., Вopilкин А.Х., Бадалян В.Г.* Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справочник). – М.: ООО "НПЦ "Эхо+", 2004.
19. *Троицкий В.А.* Ультразвуковой контроль. Дефектоскопы, нормативные документы, стандарты по УЗК. – К.: Изд-во «Феникс», 2006. – 224 с.
20. *Голямина И.П.* Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1979. – 400 с.

REFERENCES

1. Standart ANSI/API Specification SDP/ISO 11961: Trebovaniya k buril'nyim trubam, 2008 [ANSI/API Specification SDP/ISO 11961: Requirements for drill pipes, 2008].
2. *Rinkevich A.B., Smorodinskiy Ya.G.* Analiz parametrov i tekhnicheskikh kharakteristik sovremennykh ul'trazvukovykh defektoskopov obshchego naznacheniya [Analysis of parameters and technical characteristics of the modern ultrasonic flaw detectors for General use], *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2002, No. 9.
3. *Mul'chin V.V., Fartushnyy R.N., Yasaev R.A., Koz'ev V.G. i dr.* Sposob avtomatizirovannogo nerazrushayushchego kontrolya kachestva trub i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Method of automated non-destructive quality control of pipes and device for its implementation]. Patent RF №2351925. Bul. No. 10, 2009.
4. Nerazrushayushchie ispytaniya: spravochnik [Non-destructive control: guide]. Book 2, Ed. by R. MAK-MASTERA. Moscow: Izd-vo «Energiya», 1965, 504 p.
5. *Krautkremer Y., Krautkremer G.* Ul'trazvukovoy kontrol' metallov: spravochnik [Ultrasonic inspection of metals": guide]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 752 p.
6. *Shrayber D.S.* Ul'trazvukovaya defektoskopiya [Ultrasonic testing]. Moscow: Metallurgiya, 1965, 416 p.
7. Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika: spravochnik [Nondestructive testing and diagnostics: guide], Ed. by V.V. Klyueva. Moscow: Mashinostroenie, 2003.
8. *Ermolov I.N., Lange Yu.V.* Ul'trazvukovoy kontrol' [Ultrasonic testing]. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 864 p.

9. GOST 17410-78. Kontrol' nerazrushayushchiy. Truby metallicheskie besshovnye tsilindricheskie. Metody ul'trazvukovoy defektoskopii. [State Standard 17410-78. The non-destructive control. The seamless cylindrical metal pipes. Methods of ultrasonic flaw detection].
10. *Shcherbinskiy V.G., Samedov Ya.Yu., Artem'ev S.A.* Avtomatizirovannye ustanovki dlya kontrolya prokatnykh vlvkov [Automated setting for control of rolling vlvkov], *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2004, No. 6.
11. *Vybornov B.I.* Ul'trazvukovaya defektoskopiya [Ultrasonic testing]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 256 p.
12. *Lange Yu.V., Voronkov V.A.* Kontrol' nerazrushayushchiy akusticheskiy. Terminy i opredeleniya: spravochnik [Acoustic non-destructive control. Terms and definitions: guide]. 2nd ed. Moscow, 2003.
13. *Ermolov I.N., Ermolov M.I.* Ul'trazvukovoy kontrol': uchebnik dlya spetsialistov 1 i 2 urovney kvalifikatsii [Ultrasonic control. Tutorial for experts 1 and 2 skill levels]. 5th ed. Moscow, 2003.
14. *Ermolov I.N., Aleshin N.P., Potapov A.I.* Nerazrushayushchiy kontrol'. Kn. 2. Akusticheskie metody kontrolya [Non-Destructive control. Book 2. Acoustic methods of control]. Moscow: Vysshaya shkola, 1991, 283 p.
15. Ul'trazvukovye preobrazovateli dlya nerazrushayushchego kontrolya [Ultrasonic transducers for nondestructive control], Ed. by I.N. Ermolova. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 280 p.
16. Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya [Theory and practice of ultrasonic control], Ed. by I.N. Ermolova. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 240 p.
17. *Ermolov I.N., Lange Yu.V.* Nerazrushayushchiy kontrol': cpravochnik [Non-Destructive control: guide], Ed. by V.V. Klyueva. Vol. 3. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 864 p.
18. *Ermolov I.N., Vopilkin A.Kh., Badalyan V.G.* Raschety v ul'trazvukovoy defektoskopii (kratkiy spravochnik) [Calculations in ultrasonic flaw detection (a brief guide)]. Moscow: OOO "NPTs "Ekho+", 2004.
19. *Troitskiy V.A.* Ul'trazvukovoy kontrol'. Defektoskopy, normativnye dokumenty, standarty po UZK [Ultrasonic control. Flaw, regulations, standards UT]. Kiev: Izd-vo «Feniks», 2006, 224 p.
20. *Golyamina I.P.* Ul'trazvuk. Malen'kaya entsiklopediya [Ultrasound. A small encyclopedia]. Moscow: Izd-vo «Sovetskaya entsiklopediya», 1979, 400 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Чернов.

Иванов Алексей Николаевич – ОАО «Таганрогский металлургический завод»; e-mail: al_013@mail.ru; г. Таганрог ул. Кузнечная, 13, кв. 3; тел.: 89081757237, 89515368406; магистр; мастер в лаборатории средств неразрушающего контроля.

Тимошенко Владимир Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: al_013@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371795, 88634310635; кафедра электрогидроакустики и медицинской техники; д.т.н.; профессор; Президент Южного отделения РАО.

Ivanov Alexey Nikolaevich – PJSC "Taganrog Metallurgical Factory"; e-mail: al_013@mail.ru; 13, Kuznechnaya street, ap. 3, Taganrog, Russia; phones: +79081757237, +79515368406; magistr; master in the laboratory of nondestructive control.

Timoshenko Vladimir Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: al_013@mail.ru; 44, Nekrasovsky lane, Taganrog, 347928, Russia; phones: +78634371795, +78634310635; the department of electrohydroacoustics and medical technique; dr. of eng. sc.; professor; the President of South separation RAO.