

13. *Evtuytov A.P., Mit'ko V.B.* Primery inzhenernykh raschetov v gidroakustike [Examples of engineering calculations in hydroacoustics]. Leningrad: Sudostroenie, 1981, 256 p.
14. Radiolokatsionnye sistemy spetsial'nogo i grazhdanskogo naznacheniya [Radar systems for military and civilian use], ed. by Yu.I. Belogo. Moscow: Radiotekhnika, 2011, 920 p.
15. Radiolokatsionnye sistemy spetsial'nogo i grazhdanskogo naznacheniya [Radar systems for military and civilian use], ed. by Yu.I. Belogo. Moscow: Izd-vo «Radiotekhnika», 2016, 888 p.
16. *Kirichenko I.A., Pivnev P.P.* Algoritm upravleniya napravlennymi svoystvami akusticheskikh antenn s krivolineynoy izluchayushchey poverkhnost'yu [The control algorithm of the directional properties of acoustic antennas with a curved radiating surface], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 9 (134), pp. 37-42.
17. *Smaryshev M.D.* Napravlennost' gidroakusticheskikh antenn [The orientation of the hydroacoustic antennas]. Leningrad: Sudostroenie, 1973, 275 p.
18. *Novikov B.K., Timoshenko V.I.* Parametricheskie anteny v gidrolokatsii [Parametric antenna in sonar]. Leningrad: Sudostroenie, 1990, 256 p.
19. *Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P.* Teoreticheskie osnovy akustiki okeana [Theoretical foundations of ocean acoustics]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982, 264 p.
20. *Voronin V.A., Khodotov A.V., Sknarya A.V., Tarasov S.P., Trusilov V.T.* Ispol'zovanie gidrolokatora bokovogo obzora so slozhnymi signalami loya ekologicheskogo monitoringa dna i inzhenernykh podvodnykh sooruzheniy [The use of side-scan sonar with complex signals Loja environmental monitoring of the seabed and underwater engineering structures], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2004, No. 5 (40), pp. 80-82.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.П. Кузнецов.

Пивнев Петр Петрович – Южный Федеральный университет; e-mail: pivnevpp@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; к.т.н.; доцент.

Тарасов Сергей Павлович – e-mail: sptarasov@sfedu.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Воронин Василий Алексеевич – e-mail: vasalvoronin@sfedu.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Pivnev Peter Petrovich – Southern Federal University; e-mail pivnevpp@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, build. E, Taganrog, GSP 17A, 347928, Russia; the department of hydroacoustics and medical engineering; associate professor.

Tarasov Sergei Pavlovich – e-mail sptarasov@sfedu.ru; the department of hydroacoustics and medical engineering; professor.

Voronin Vasily Alexeevich – e-mail vasalvoronin@sfedu.ru; the department of hydroacoustics and medical engineering; professor.

УДК 620.179.16

А.Н. Иванов, В.И. Тимошенко

ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА «ДЭКОТ» ПРИ КОНТРОЛЕ БЕСШОВНЫХ ТРУБ НЕФТЯНОГО СОРТАМЕНТА НА ПАО «ТАГМЕТ»

В данной статье рассмотрен иммерсионный метод прозвучивания бесшовных труб продольного сканирования поперечными волнами, распространяющимися в ее стенке по зигзагообразной траектории перпендикулярно образующей. Рассмотрены особенности и оптимизация импульсного эхо-метода контроля, обеспечивающего высокую чувствитель-

ность, разрешающую способность, возможность определения местоположения дефекта, при использовании продольных и сдвиговых волн. Рассмотрены основные элементы ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя, предназначенного для генерирования и регистрации высокочастотных ультразвуковых колебаний, где для изготовления активных элементов зачастую используют поляризуемый керамический материал, который возбуждают волны различного типа, а за счет демпфера повышают разрешающую способность при некотором снижении амплитуды выходного сигнала. Выбрана толщина протектора основываясь на идеи конструктивной интерференции, что допускает прохождение волны, генерируемой активным элементом, так, чтобы она была в фазе с волной, переотраженной в протекторе. Приведена схема распространения луча для не фокусированного преобразователя и зависимость амплитуды излучения от угла между лучом и осью. Рассмотрены два основных принципа при использовании ультразвука, где первый основан на измерении времени пробега ультразвука в изделии, а второй на измерении амплитуды отраженного сигнала. Выбрана рабочая частота контроля при ультразвуковой дефектоскопии, выбрана исходя из условия уменьшения уровня структурных шумов и повышения разрешающей способности к дефектам. Выбрана частота контроля, которая по данным практики является оптимальной, для контроля деформированной стали средних габаритов. Выбран материал для преобразователя обеспечивающий высокую эффективность при работе эхометодом. Вычислена емкость преобразователя, обеспечивающего 100 % контроль трубы. Приведено условие для обеспечения выявления дефекта, определена величина порога электрической чувствительности дефектоскопа, коэффициенты характеризующие электроакустический тракт, функция, определяющая ослабление сигнала в акустическом тракте, функция, определяющая связь преобразователя с трубой, функция, определяющая согласованием пьезоискателя с генератором и усилителем. Определена индуктивность контура генератора при максимальной амплитуде акустической волны. Определена оптимальная частота повторения дефектоскопов установки, количество оборотов трубы, необходимых для обеспечения требуемой производительности, длина трубы по окружности прозвучиваемая за одну минуту, ширина ультразвукового луча в стенке трубы без учёта расширения его вследствие кривизны границы раздела вода-металл, и длина пути ультразвукового луча, обтекающего трубу. Определено время прохождения луча ультразвукового колебания от преобразователя до дефектов в трубе. Определена частота повторения зондирующих импульсов и амплитуда. Приведен метод аналитического расчета шага сканирования с учетом соотношения ширины зоны перекрытия при сканировании, ширины пьезоэлектрического преобразователя и плотности потока зондирующих импульсов. Рассмотрен выбор параметров пьезоэлектрического преобразователя для обеспечения прозвучивания всего сечения стенки трубы и проверка электроакустического тракта дефектоскопа. Определена ширина преобразователя и вычислено время прохождения луча ультразвукового колебания от преобразователя до дефекта в трубе. Оптимизирована величина шага сканирования и установлена максимальная производительность линий контроля.

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

A.N. Ivanov, V.I. Timoshenko

CHECK ELECTROACOUSTIC TRACT FLAW DETECTOR "DACOT" TO CONTROL THE SEAMLESS PIPES FOR OIL INDUSTRY IN JSC "TAGMET"

This article describes the immersion method of testing seamless pipes by longitudinal scan transverse waves propagating in the pipe wall in a zigzag path perpendicular to the forming one. Described are the characteristics and optimization of pulse-echo inspection method that provides high sensitivity, resolution, and the ability to determine the location of the defect, by using longitudinal and shear waves. Described are the main elements of the ultrasonic piezoelectric transducer designed to generate and detect the high-frequency ultrasonic vibrations,

where the polarized ceramic material is often used for the production of active elements, which excites waves of different type, and due to the damper increases the resolution with lower amplitude of the output signal. The selected thickness of the protector based on ideas of constructive interference that allows the passage of waves generated by an active element, so that it was in phase with the wave multipath in the tread. The scheme of distribution of the beam is not focused transducer and the amplitude of the radiation on the angle between the beam and the axle. Considered are two basic principles when using ultrasound, where the first is based on measuring the travel time of ultrasound in the product, and the second on the measurement of the amplitude of the reflected signal. The selected operating frequency control for ultrasonic flaw, detection selected based on the conditions of reducing the level of structural noise and increase the ability to resolve defects. The selected frequency control, which, according to practice, is optimal to control deformed steel medium size. Selected is the material for the Converter providing high efficiency when using the echo method. Calculated is the capacity of the Converter, providing 100% control of the pipe. Given is the condition to ensure the detection of the defect, determined are the value of the threshold electric sensitivity of the flaw detector, the coefficients characterizing the electro-acoustic path, the function that determines the attenuation in the acoustic path, function, defined are the connection of the transducer with the pipe, the function that determines the alignment of piezo finder with generator and amplifier. Determined is the inductance of the generator at maximum amplitude of the acoustic wave. The optimal repetition frequency of the flaw detector instrument, the number of revolutions of the pipe required to provide the required performance, the length of the pipe around the circumference highly in one minute, the width of the ultrasonic beam into the pipe wall without an extension due to the curvature of the interface water-metal, and the length of the path of the ultrasound beam encircling the pipe are determined. Determined are the time of passage of the beam of ultrasonic vibrations from the transducer to the defect in the pipe, the frequency of pulse repetition, and amplitude. Given is the method of the analytical calculation of scanning step, taking into account the ratio of the scan width overlap zone in the piezoelectric transducer and the flux density of the probing pulses. Considered is the choice of parameters of the piezoelectric transducer to ensure testing of the entire cross section of the pipe wall and verification of electroacoustic tract flaw detector. Determined are the width of the transducer and the calculated travel time of the beam of ultrasonic vibrations from the transducer to the defect in the pipe. Optimized is the step size and the maximum performance of control lines is established.

Ultrasonic inspection of tubes; piezoelectric transducers; scanning step; electro-acoustic path; the artificial defect.

Введение. Появление современных крупномасштабных объектов – атомных электростанций, морских буровых установок – привело наряду с экономическими выгодами к большому негативным последствиям в случае выхода их из строя. Человечество не может отказаться от таких технологий, но можно предотвратить катастрофы или уменьшить их последствия путем эффективного использования неразрушающего контроля и диагностики [1, 2]. Во всем мире ежегодно увеличивается число крупных аварий и катастроф. Потери только от дефектов усталости металла в США составляют более 100 млрд. долл. в год, а от коррозии – более 200 млрд. долл. в год. Убытки от низкого качества материалов и изделий в России значительно выше, а если учесть, что часть промышленной продукции не внедряется в производство, сравнительно быстро выходит из строя по различным техническим и организационным причинам, принять во внимание колоссальные объемы ремонта, нарушение экологии, то потери материального и морального порядка еще более возрастают [3, 4].

Неразрушающий контроль и диагностика – начинающие и определяющие составные части проблемы безопасности. Контроль обозначает проверку соответствия параметров объекта установленным техническим требованиям, а неразрушающие методы контроля не должны нарушать пригодность объекта к приме-

нию. Несоответствие продукции установленным требованиям является дефектом, для обнаружения и поиска которого используются теория, методы и средства технической диагностики. В значительной мере качество продукции зависит от состояния неразрушающего контроля, от степени использования последних достижений в этой области [5].

Постановка задачи. В процедурах контроля фирмы «Exxon Mobil» заложено требование, что расстояние между двумя зондирующими импульсами (расстояние между двумя измерениями) должно быть не более 1 мм. В системе «ДЭКТО» амплитуда зондирующих импульсов задана 200 В, 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 [6]. 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. Правильный выбор соотношений ширины поля пьезоэлектрического преобразователя, ширины зоны перекрытия при сканировании и размерами минимально допустимого дефекта позволит более качественно настраивать чувствительность преобразователей, и повысить достоверность контроля, достигая наивысшей на рынке производительности и соответствовать современным мировым требованиям и стандартам. Данная статья позволяет решить эти вопросы.

Ультразвуковой контроль основан на способности энергии ультразвуковых колебаний, распространяться с малыми потерями в однородной упругой среде и отражаться от нарушений сплошности в контролируемом объекте [7, 8].

Рассматриваемые характеристики распространения ультразвуковых волн, используемые для контроля, могут включать:

- 1) скорость распространения волн;
- 2) геометрию луча;
- 3) условия передачи энергии (отражение, преломление или трансформацию колебаний);
- 4) потери энергии (рассеяние, поглощение).

При распространении акустических волн их амплитуда уменьшается – происходит ослабление волны. Главные причины ослабления – расхождение и затухание. В зависимости от формы источника звуковых колебаний могут образовываться акустические волны с различной формой фронта волны. Для плоской волны расхождение лучей отсутствует и ее ослабление обусловлено только затуханием [9]. Величина ослабления от затухания пропорциональна множителю:

$$e^{-\delta \cdot x},$$

где e – число Непера ($e=2,73\dots$); δ – коэффициент затухания; x – расстояние, пройденное волной.

Ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь предназначен для генерирования и регистрации высокочастотных ультразвуковых колебаний (рис. 1) [10].

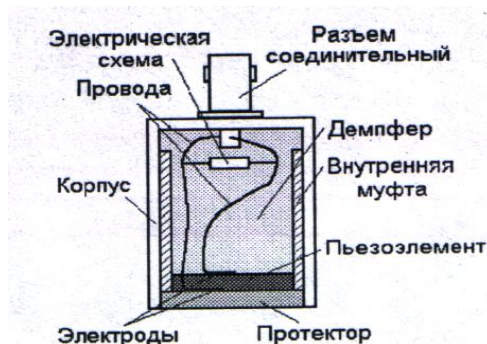


Рис. 1. Ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь

Его основными элементами являются: активный элемент (пьезоэлемент), демпфер и протектор [11]:

1. Активный элемент (пьезоэлемент), изготавливаемый из пьезо или сегнето-электрических материалов, преобразовывает электрическую энергию, подаваемую на него в виде электрического импульса возбуждения от генератора, в энергию ультразвуковых колебаний. Он также обеспечивает обратное преобразование энергии ультразвуковых колебаний в электрическую. Для изготовления активных элементов зачастую используются поляризуемые керамические материалы, которые возбуждают волны различного типа.
2. Демпфер изготавливается из материала с высоким акустическим сопротивлением. Вследствие этого преобразователь имеет высокое внутреннее затухание, и основная часть энергии излучается в направлении прозвучивания. За счет этого повышается разрешающая способность при некотором снижении амплитуды выходного сигнала. Если демпфер и активный элемент имеют близкие значения акустических импедансов, в объект контроля будет излучаться только небольшая часть энергии и преобразователь, будет иметь низкую разрешающую способность, а амплитуда излучаемого сигнала будет несколько выше.
3. Протектор служит для защиты активного элемента от истирания. Для преобразователей протектор должен изготавливаться из материала с высокой коррозионной и эрозионной стойкостью. Для иммерсионных преобразователей протектор дополнительно служит в качестве акустического трансформатора между активным элементом с высоким акустическим импедансом и водой, имеющим низкое акустическое сопротивление. Это условие выполняется путем обеспечения толщины протектора, равной примерно $\frac{1}{4}$ длины волны ультразвука, и соответствующим значением акустического импеданса (активный элемент обычно имеет толщину, равную примерно $\frac{1}{2}$ длины волны). Выбор толщины протектора основывается на идеи конструктивной интерференции, что допускает прохождение волны, генерируемой активным элементом, так, чтобы она была в фазе с волной, преломленной в протекторе.

Акустическое поле преобразователя в общем случае можно представить в виде расходящегося конуса лучей. Амплитуда вдоль оси луча уменьшается. Для луча под некоторым углом к оси амплитуда также уменьшается. Угол, при котором амплитуда сигнала становится равной нулю, будет углом раскрытия [12]. Чем меньше угол раскрытия диаграммы направленности, тем выше направленность поля преоб-

разователя. Высокая направленность поля позволяет снизить погрешность измерений, обусловленную геометрическими характеристиками объекта контроля (переотражения от стенок и углов), вызывающими случайные сигналы, сопоставимые с сигналами от дефектов [2]. Схема распространения луча для не фокусированного преобразователя (см. рис. 2) [13], согласно которой угол раскрытия рассчитывается по следующей зависимости (для случая круглой пьезопластины):

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin \left[\frac{0,514 \cdot c}{f \cdot D} \right],$$

где c – скорость звука в материале (для прямого преобразователя – продольных волн, для наклонного – поперечных волн); f – частота; D – диаметр пьезопластины.

Как видно из зависимости, для увеличения направленности излучения следует увеличить частоту и размеры пьезопластины [14]. Для наклонного преобразователя направленность поля выше, чем для прямого (скорость поперечных волн меньше, чем продольных).

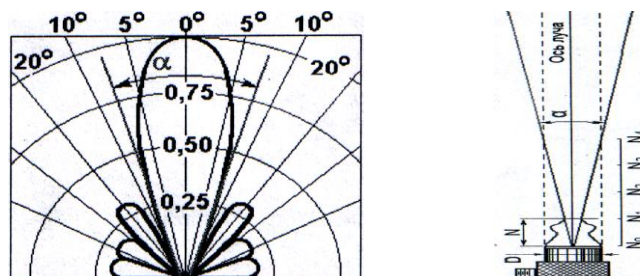


Рис. 2. Зависимость амплитуды излучения от угла между лучом и осью

Ультразвуковой метод неразрушающего контроля основан на введении в тестируемый объект высокочастотной волны для получения информации, о его состоянии.

Существует два основных принципа при использовании ультразвука [15]. Первый основан на измерении времени пробега ультразвука в изделии, второй – на измерении амплитуды отраженного сигнала. Зная время пробега (t) и скорость ультразвука (c), можно вычислить толщину материала (S) по следующей зависимости:

$$S = 0,5 \cdot c \cdot t.$$

Измерение относительного изменения амплитуды сигнала может быть использовано для измерения размеров дефектов или оценки ослабления сигнала в данном материале. Относительное изменение амплитуды сигнала измеряется в децибелах. Величина изменения амплитуды сигнала в децибелах равна отношению амплитуды сигнала на входе в объект контроля ($A1$) к амплитуде сигнала, полученного после отражения от дефекта или дна изделия ($A2$). Она может быть вычислена по следующей зависимости:

$$dB = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{A1}{A2} \right).$$

Ультразвуковой контроль использует упругие колебания высокой частоты в диапазоне от 1 до 25 МГц. При увеличении частоты длина волны ультразвуковых колебаний уменьшается. Поэтому ультразвуковые волны могут отражаться от более маленьких поверхностей, таких как дефекты в материалах [16]. Это позволяет использовать ультразвук для поиска дефектов с очень малыми размерами.

Возбуждение и прием упругих волн осуществляется путем преобразования электрических колебаний в акустические, а затем обратно акустических в электрические с помощью специальных устройств – пьезоэлектрических преобразователей, имеющих чувствительный элемент – пьезопластину. Если упруго деформировать пьезопластину, то на ее поверхности возникает разность потенциалов, изменение во времени и величина которых пропорциональны такому внешнему механическому воздействию. При подаче электрического сигнала (импульса) на поверхности пьезопластины происходит ее упругая деформация [17]. Смещение грани пьезопластины весьма мало и не превышает 10^{-4} мм.

Если колебания в пьезопластине возбудить электрическим импульсом, а затем предоставить ей возможность свободно колебаться, то колебания будут происходить на собственной частоте f_0 , пропорциональной скорости звука в материале пьезопластины c и ее толщине h .

$$f_0 = \frac{c}{2h}.$$

Из формулы видно, что чем тоньше пьезопластина, тем выше ее собственная частота.

Рабочая частота контроля при ультразвуковой дефектоскопии выбирается исходя из условия уменьшения уровня структурных шумов и повышения разрешающей способности к дефектам. Как указано в работе [18] для уменьшения уровня структурных шумов необходимо, чтобы длина ультразвуковой волны в металле $\lambda \geq (10:15) \cdot D$, где D – величина зерна. Выбираем частоту контроля $2,5$ МГц, которая по данным практики является оптимальной, для контроля деформированной стали средних габаритов.

В качестве материала для преобразователя используем пьезокерамику типа ЦТС-19, обеспечивающую высокую эффективность при работе эхо-методом [19]. Эта пьезокерамика из наиболее широко используемого пьезоматериала – цирконата-титаната свинца, скорость звука в котором $c=3300$ м/с при толщине $0,660$ мм. собственная частота f_0 будет равна $2,5$ МГц., а при толщине $0,33$ мм – $f_0=5$ МГц.

На практике под влиянием конструктивных элементов пьезоэлектрического преобразователя, непосредственно контактирующих с пьезопластиной собственная частота не много меняется.

Недостатком указанного материала является высокая диэлектрическая постоянная $E=1500$ и, соответственно, большая собственная емкость пластины.

Величина собственной емкости определяется формулой:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot E \cdot S_a}{d},$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; S_a – площадь пьезопластины; d – толщина пьезоэлемента колеблющегося на собственной частоте по толщине.

Емкость преобразователя, обеспечивающего 100% контроль трубы, равна

$$C = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,5 \cdot 10^3 \cdot 600^{-6}}{0,72 \cdot 10^{-3}} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ пФ.}$$

Для возбуждения преобразователя с такой большой емкостью требуется генератор с очень мощным выходом. При использовании в качестве дефектоскопа «ДЭКТО» целесообразно использовать многоканальный преобразователь. Уменьшить длину преобразователя также целесообразно для улучшения выявляемости дефектов небольшой протяженности [6]. Длина пьезоэлемента при восьмиканаль-

ной схеме контроля равна 12,5 мм, емкость пьезоэлемента шириной 10 мм равна $C=2,3 \times 10^3$ нФ. Емкость кабеля равна 120 нФ/м. С учетом соединительного кабеля общая емкость пьезоэлемента $C_e=1,5 \times 10^3$ нФ.

Для обеспечения выявления дефекта должно выполняться условие [12]:

$$\frac{U'}{U_0} > \frac{U_{min}}{U_0},$$

где U' – амплитуда электрического сигнала на входе усилителя дефектоскопа; U_0 – амплитуда электрического сигнала генератора дефектоскопа; U_{min} – минимальный сигнал, регистрируемый усилителем дефектоскопа.

Величину U_{min} / U_0 можно назвать порогом электрической чувствительности дефектоскопа.

$$\frac{U'}{U_0} = U \cdot U' \cdot \varphi(\beta, z, \alpha, \lambda, \sigma),$$

где U и U' – коэффициенты характеризующие электроакустический тракт; $\varphi(b, z, a, \lambda, \sigma)$ – функция, определяющая ослабление сигнала в акустическом тракте.

$$U \cdot U' = \frac{2e^2 \cdot S_a}{d^2 \cdot c \cdot \rho} |Z_a \cdot b^2| \cdot F^2,$$

где e – пьезоконстанта преобразователя; S_a – площадь преобразователя; d – толщина преобразователя; ρ – плотность материала; C – ёмкость преобразователя; $C \cdot \rho = Z$ – акустическое сопротивление материала, в который происходит излучение; Z_a – входной импеданс усилителя; b – функция, учитывающая резонансные свойства электрического контура генератора; F – функция, определяющая связь преобразователя с трубой.

Функция $(Z_a \cdot b)$ определяется согласованием пьезоискателя с генератором и усилителем [13]. При настройке электрического контура, в который входит пьезоэлемент, в резонансе на частоте соответствующей частоте собственных колебаний пьезоэлемента $b = 1$ и соответственно:

$$Z_a \cdot b^2 \approx R_a,$$

где R_a – активное сопротивление на входе усилителя.

Следовательно, при прочих равных условиях максимальная чувствительность дефектоскопа будет при настройке в резонанс контура генератора на частоте, равной частоте собственных колебаний пьезоэлемента [20].

Акустическое сопротивление материала характеризуется величиной акустического импеданса (Z), равного произведению скорости звука в материале (c) на плотность материала (ρ). Поскольку скорости распространения продольных волн больше, чем поперечных, то для них акустическое сопротивление выше. Именно этим объясняется тот факт, что ультразвуковую дефектоскопию главным образом проводят с использованием поперечных волн. При нормальном падении ультразвука на акустический интерфейс (граница между двумя материалами с различными акустическими импедансами) часть акустической энергии отражается, а другая часть проходит через границу раздела. Если контактирующие материалы имеют акустические импедансы $Z1$ и $Z2$, доля энергии, прошедшей через границу раздела, может быть определена через коэффициент прозрачности D , а доля отраженной энергии – через коэффициент отражения R [9].

$$D = \left[\frac{4 \cdot Z1 \cdot Z2}{(Z1 + Z2)^2} \right] \quad R = \left[\frac{(Z2 - Z1)}{(Z1 + Z2)^2} \right] \quad D + R = 1.$$

Если отражение не является главным фактором затухания ультразвука, то причинами ослабления ультразвука в материале является: дифракция, рассеяния и поглощение. Ослабление ультразвука в материале может играть важную роль при выборе преобразователей для проведения контроля изделий. При наличии слоя контактной жидкости на границе раздела происходит интерференционное переотражение ультразвуковой волны. Если акустический импеданс промежуточного слоя лежит в интервале между Z_1 и Z_2 , то при определенной толщине промежуточного слоя имеет место «просветление границы раздела». Максимальная прозрачность ($D=1$) достигается при толщине слоя, равной одной четверти длины волны ультразвука в слое.

Определим индуктивность контура генератора из формулы [17]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_e}},$$

где f_0 – собственная частота преобразователя; L – индуктивность контура генератора; C_e – суммарная ёмкость преобразователя и соединительного кабеля.

В результате экспериментальной проверки установлено, что максимальная амплитуда акустической волны получается при индуктивности $L=0,7$ мкГн.

Путь ультразвука от излучателя до дефекта и обратно называется акустическим трактом. Формулы для расчета акустического тракта определяют ослабление сигнала на этом пути. Амплитуда отраженного эхо-сигнала уменьшается с увеличением расстояния до дефекта и уменьшением размеров дефекта. Для расчета акустического тракта используются искусственные отражатели.

Определим оптимальную частоту повторения дефектоскопов установки. Установка согласно техническому заданию должна обеспечивать производительность 15 м/мин. При контроле труб диаметром 114 мм шаг сканирования определяется углом разворота роликов колёсного рольганга θ . На ПАО «Тагмет» стандартный рольганг имеет угол разворота роликов $\theta=8^\circ$ [6].

Шаг сканирования a равен: $a=\pi D \operatorname{tg}\theta$, тогда:

$$a = 3,14 \times 114 \times \operatorname{tg} 8^\circ = 50 \text{ мм.}$$

Количество оборотов трубы и необходимых для обеспечения требуемой производительности:

$$n = \frac{15000}{50} = 300 \text{ об./мин.}$$

Длина трубы по окружности прозвучиваемая за одну минуту:

$$m = \pi \times D \times n = 107,4 \text{ м.}$$

Ширина ультразвукового луча в стенке трубы « b' » без учёта расширения его вследствие кривизны границы раздела вода-металл равна:

$$b' = \frac{b}{\cos \alpha} = 10,5 \text{ мм.}$$

Считая, что для устойчивой регистрации необходимо 5 посылок, скорость движения поверхности трубы относительно датчика должна быть равна:

$$\frac{b'}{5} = 2 \text{ мм/посылка.}$$

При выбранной частоте посылок должно быть исключено попадание многократных «кольцевых» импульсов в зону контроля. Длина пути ультразвукового луча, обегая трубу, равна:

$$\frac{\pi \cdot D}{\sin \gamma t}.$$

Допустимая частота для устранения попадания кольцевых импульсов в зоне контроля при условии прохождения до трёх «кольцевых» [9].

$$f_{pred.def} = \frac{Ct \cdot \sin \gamma t}{3\pi D}.$$

Время прохождения луча ультразвукового колебания от преобразователя до дефектов в трубе можно определить выражением [13]:

$$t = \frac{2L_m}{c_m} + \frac{4L_t}{c_t},$$

где t – время прохождения луча ультразвукового колебания; $L_m \approx 30$ мм – длина пути луча ультразвукового колебания; $c_m = 1500$ м/сек – скорость распространения звука в воде; $L_t \approx 30$ мм – длина пути луча ультразвукового колебания от наружной до внутренней стенки трубы; $c_t = 3240$ м/сек – скорость распространения сдвиговой волны в трубе.

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

Необходимо при этих условиях частоту повторения зондирующих импульсов увеличить до 3 кГц , амплитуду до $180\text{--}200 \text{ В}$.

Выводы:

1. Для обеспечения эффективного и надежного ультразвукового контроля труб и обнаружения дефектов (риски) длиной $1''$ и плоскостных отверстий $\varnothing 3,2 \text{ мм}$ для диаметров от 73 до 273 мм с толщиной стенки от 5 до 30 мм , используем две восьмиканальные кассеты, расположенные друг против друга с пьезоэлектрическими преобразователями длиной $12,5 \text{ мм}$ и шириной 10 мм каждый, работающих на частоте $2,5 \text{ МГц}$, и толщиной с шестнадцатью пьезоэлектрическими преобразователями цилиндрической формы, размер каждого 6 мм , работающих на частоте $5,0 \text{ МГц}$ и из расчетов выбран шаг оптимального сканирования 50 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. *Мищенко И.М.* Черная металлургия и охрана окружающей среды: учеб. пособие. – Донецк: ДонНТУ, 2012. – 446 с.
2. *Шицкова А.П., Новиков Ю.В. и др.* Охрана окружающей среды от загрязнения предприятиями черной металлургии. – М.: Металлургия, 1982. – 208 с.
3. *Большина Е.П.* Экология металлургического производства: курс лекций. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2012. – 155 с.
4. *Белый О.А., Немененок Б.М.* Экология промышленного производства: учеб. пособие. – Минск: БНТУ, 2016. – 345 с.
5. *Павлович Л.Б., Титова О.О.* Экологические проблемы металлургического производства: учеб. пособие. – Новокузнецк: СибГИУ, 2015. – 211 с.
6. 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 г.
7. *Алешин Н.П., Белый В.Е.* Методы акустического контроля металлов. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
8. *Алешин Н.П., Белый В.Е., Вопилкин А.Х. и др.* Методы акустического контроля металлов / под ред. Алешина Н.П. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
9. *Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Патапов А.И.* Неразрушающий контроль. – М.: Высшая школа, 1991. – Т. 2. – 283 с.
10. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / под общей ред. Клюева В.В. – М.: Машиностроение, 2003.
11. *Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др.* Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / под ред. Клюева В.В. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
12. *Крауткремер Й., Крауткремер Г.* Ультразвуковой контроль металлов. Справочник. – М.: Металлургия, 1991.
13. *Шрайбер Д.С.* Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Металлургия 1965. – 416 с.
14. *Королев М.В.* Эхо-импульсные ультразвуковые толщиномеры. – М.: Машиностроение, 1980. – 112 с.
15. *Ермолов И.Н.* Методы ультразвуковой дефектоскопии. Ч. I. – М.: Горный институт, 1966 /курс лекций/.
16. *Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.* Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004.
17. *Ермолов И.Н., Вопилкин А.Х., Бадалян В.Г.* Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии. Краткий справочник. Издано ООО НПЦ «ЭХО +»М., 2000.
18. *Декель А.К.* Дефектоскопия металлов. – М.: Металлургия. 1972.
19. *Белокур И.П., Коваленко В.А.* Дефектоскопия материалов и изделий. – Киев: Техника. 1989.
20. *Козлов В.В.* Проверка средств неразрушающего контроля. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 215 с.

REFERENCES

1. *Mishchenko I.M.* Chernaya metallurgiya i okhrana okruzhayushchey sredy: ucheb. posobie [Metallurgy and environmental protection: a tutorial]. Donetsk: DonNTU, 2012, 446 p.
2. *Shitskova A.P., Novikov Yu.V. i dr.* Okhrana okruzhayushchey sredy ot zagryazneniya predpriyatiyami chernoy metallurgii [Environmental Protection from pollution by enterprises of ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 208 p.
3. *Bol'shina E.P.* Ekologiya metallurgicheskogo proizvodstva: kurs lektsiy [Ecology of metallurgical production: a Course of lectures]. Novotroitsk: NF NITU «MISiS», 2012, 155 p.
4. *Belyy O.A., Nemenenok B.M.* Ekologiya promyshlennogo proizvodstva: ucheb. posobie [Industrial Ecology: a textbook]. Minsk: BNTU, 2016, 345 p.
5. *Pavlovich L.B., Titova O.O.* Ekologicheskie problemy metallurgicheskogo proizvodstva: ucheb. posobie [Ecological problems of metallurgical production: a tutorial]. Novokuznetsk: SibGIU, 2015, 211 p.

6. *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 for automated nondestructive testing of pipes and device for its implementation]. Patent RF for the invention No.2351925. Byul. No.10, 2009 g.
7. *Aleshin N.P., Belyy V.E.* Metody akusticheskogo kontrolya metallov [Methods of acoustic control of metals]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 456 p.
8. *Aleshin N.P., Belyy V.E., Vopilkin A.Kh. i dr.* Metody akusticheskogo kontrolya metallov [Methods of acoustic control of metals], ed. by Aleshina N.P. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 456 p.
9. *Ermolov I.N., Aleshin N.P., Patapov A.I.* Nerazrushayushchiy kontrol' [non-destructive testing]. Moscow: Vysshaya shkola, 1991, Vol. 2, 283 p.
10. Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika. Spravochnik [Nondestructive testing and diagnostics": a Reference], under the general ed. Klyueva V.V. Moscow: Mashinostroenie, 2003.
11. *Klyuev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V. i dr.* Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika: Spravochnik [Nondestructive testing and diagnostics: Reference book], ed. by Klyueva V.V. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 656 p.
12. *Krautkremer Y., Krautkremer G.* Ul'trazvukovoy kontrol' metallov. Spravochnik [Ultrasonic inspection of metals: Handbook]. Moscow: Metallurgiya, 1991.
13. *Shrayber D.S.* Ul'trazvukovaya defektoskopiya [Ultrasonic testing]. Moscow: Metallurgiya 1965, 416 p.
14. *Korolev M.V.* Ekho-impul'snye ul'trazvukovye tolshchinometry [Pulse-Echo ultrasonic thickness gauges]. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 112 p.
15. *Ermolov I.N.* Metody ul'trazvukovoy defektoskopii [Methods for ultrasonic testing]. Part I. Moscow: Gornyy institut, 1966 /ectures/.
16. *Ermolov I.N., Lange Yu.V.* Ul'trazvukovoy kontrol' [Ultrasonic testing]. Moscow: Mashinostroenie, 2004.
17. *Ermolov I.N., Vopilkin A.Kh., Badalyan V.G.* Raschety v ul'trazvukovoy defektoskopii. Kratkiy spravochnik [Calculations in ultrasonic flaw detection. Quick reference guide]. Izdano OOO NPTs «EKHO +»M., 2000.
18. *Dekel' A.K.* Defektoskopiya metallov [Testing of metals]. Moscow: Metallurgiya. 1972.
19. *Belokur I.P., Kovalenko V.A.* Defektoskopiya materialov i izdeliy [Nondestructive Testing of materials and products]. Kiev: Tekhnika. 1989.
20. *Kozlov V.V.* Proverka sredstv nerazrushayushchego kontrolya [Validation of nondestructive testing]. Moscow: Izd-vo standartov, 1989, 215 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Е. Панич.

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; г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; Президент Южного отд. РАО; д.т.н.; профессор кафедры электрогидроакустики и медицинской техники.

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

Timoshenko Vladimir Ivanovich – Southern Federal University; 2, Shevchenko street, Taganrog, Russia; President of the South separation RAO; dr. of eng. sc.; professor of department electrohydroacoustics and medical technique.