

УДК 620.179.16

А.Н. Иванов, В.И. Тимошенко**МЕТОДИКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ТРУБ НЕФТЯНОГО СОРТАМЕНТА НА ОАО «ТАГМЕТ»**

Рассмотрены особенности и оптимизация импульсного эхо-метода контроля, обеспечивающего высокую чувствительность, разрешающую способность, возможность определения местоположения дефекта, при использовании продольных и сдвиговых волн. Приведены графики зависимости углов продольной и сдвиговой волны, а также коэффициенты отражения и преломления по энергии в зависимости от падения продольной ультразвуковой волны под углом из жидкости на границу раздела с твёрдым телом для системы вода–сталь. Показано прохождение ультразвуковых колебаний в трубе с большим углом ввода. Рассмотрен выбор параметров пьезоэлектрического преобразователя для обеспечения проверки электроакустического тракта дефектоскопа.

Выбор метода контроля; параметров пьезоэлектрического преобразователя; проверка электроакустического тракта дефектоскопа.

A.N. Ivanov, V.I. Timoshenko**METHODOLOGY OF ULTRASONIC CONTROL OF PIPES OF PETROLEUM ASSORTMENT ON PJSC «TAGMET»**

This article describes the features and optimization of pulse echo method for high sensitivity, resolution, and ability to determine the location of the defect, when using of longitudinal and shear waves. Shows a graphs of the angles of the longitudinal and shear waves, and coefficients of reflection and refraction as a function of incidence angle of the ultrasonic waves in the liquid at the interface with the solid. Shows the ultrasonic vibrations in a tube with a large angle spread. Consider the choice of the parameters of the piezoelectric transducer for sounding the entire cross section of pipe wall and testing electroacoustic tract of defectoscope.

Selection of method control; and a piezoelectric transducer; checking electroacoustic tract of defectoscope.

Особое внимание уделяется качественному производству труб, для обеспечения безаварийной работы буровых установок, исключения аварий на магистральных трубопроводах и поддержания экологии.

1. Выбор метода контроля. В ультразвуковой дефектоскопии изделий металлургического производства, в том числе и труб, наиболее широкое распространение получил импульсный эхо-метод контроля, обеспечивающий высокую чувствительность, разрешающую способность, возможность определения местоположения дефекта. При контроле труб выбор типа волн зависит от отношения толщины стенки (T) к наружному диаметру (D).

При $T/D > 0,2$ целесообразно использовать для контроля продольные волны, при меньших значениях ($T/D = 0,02 - 0,2$) более эффективные результаты контроля получаются при использовании сдвиговых волн, что связано с разрешающей способностью.

По техническому заданию на ОАО «Тагмет» контролю подлежат трубы с наружным диаметром от 73 до 273 мм, с толщиной стенки от 5 до 30 мм. Отношение T/D для этих труб лежит в пределах 0,02–0,4, отсюда целесообразно применить для контроля иммерсионный импульсный эхо-метод с использованием сдвиговых волн.

Рассмотрим особенности данного метода контроля.

При падении на поверхность твёрдого тела ультразвуковой волны под углом, отличным от нормального, в твёрдом теле распространяется преломленная продольная волна и сдвиговая волна, появившаяся в результате трансформации волны на границе раздела [1].

На рис. 1 приведён случай падения продольной ультразвуковой волны $U_{пад}$ под углом α из жидкости на границу раздела с твёрдым телом.

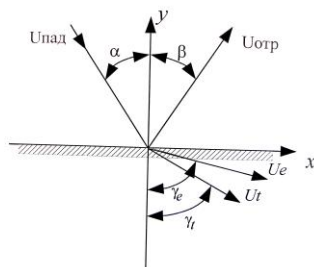


Рис. 1. Схема падающей продольной волны на границу раздела вода-сталь

В жидкости появляется отражённая волна $U_{отр}$ под углом $\beta = \alpha$. В металле распространяется продольная волна U_e с углом γ_e и сдвиговая волна U_t с углом γ_t . Угол ввода ультразвуковой волны в металле связан с углом падения законом Снеллиуса:

$$\frac{C_m \sin \alpha}{C_e \sin \gamma_e} = \frac{C_m \sin \beta}{C_e \sin \gamma_e} = \frac{C_m \sin \alpha}{C_t \sin \gamma_t}$$

где C_m – скорость распространения звука в жидкости; C_e – скорость распространения продольных волн в металле; C_t – скорость распространения сдвиговых волн в металле.

При $\sin \alpha_1 = C_m / C_e$, $\gamma_e = 90^\circ$, т.е. происходит полное внутреннее отражение продольной волны и в металле распространяется только сдвиговая (поперечная) волна.

При $\sin \alpha_2 = C_m / C_t$, $\gamma_t = 90^\circ$, т.е. происходит полное внутреннее отражение поперечной волны, и в металле распространяется только поверхностная волна.

Следовательно, для возбуждения сдвиговой волны в металле угол падения ультразвуковой волны из жидкости (α) должен лежать в пределах: $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$, где α_1 – первый критический угол; α_2 – второй критический угол.

Для случая падения ультразвуковой волны из воды в металл: $14,7^\circ < \alpha < 26,7^\circ$.

Для обеспечения максимальной амплитуды сдвиговых колебаний в металле необходимо воспользоваться приводимыми коэффициентами отражения и преломления по энергии [2]:

$$R = \frac{Z_2 \cos^2 \alpha - Z_1 \cos^2 \beta}{Z_2 \cos^2 \alpha + Z_1 \cos^2 \beta},$$

$$D_e = \frac{2 Z_1 \cos \alpha \sin \beta}{Z_2 \cos^2 \alpha + Z_1 \cos^2 \beta},$$

$$D_t = \frac{2 Z_1 \cos \alpha \sin \gamma_t}{Z_2 \cos^2 \alpha + Z_1 \cos^2 \beta},$$

где R – коэффициент отражения по энергии; D_e и D_t – коэффициенты преломления по энергии, соответственно для продольной и поперечной волн; Z_e , Z_t , Z_m – акустическое сопротивление среды; $Z = \rho c$, где ρ – плотность материала; c – ёмкость преобразователя; Z – акустическое сопротивление материала, в который происходит излучение.

Из рис. 2 видно, что оптимальный угол ввода сдвиговой волны в металле для обеспечения максимальной ультразвуковой энергии равен $\gamma t = 35-60^\circ$.

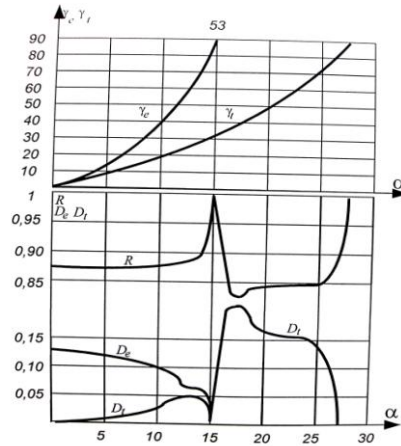


Рис. 2. Графики зависимости углов γ_t, γ_e и коэффициентов R, D_e, D_t в зависимости от α для системы вода–сталь

Необходимо также отметить, что выбор большого значения γt не позволяет выявить дефекты, лежащие на внутренней поверхности и в теле трубы.

На рис. 3 центральный луч не отражается от внутренней поверхности трубы, тем самым дефектоскоп будет выявлять преимущественно дефекты на наружной поверхности, а дефекты, лежащие у внутренней поверхности трубы, при большой толщине стенки могут быть не выявлены.

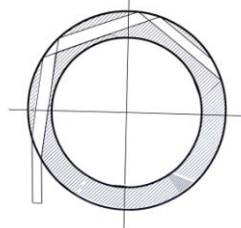


Рис. 3. Прохождение ультразвуковых колебаний в трубе с большим углом ввода

Выбираем угол ввода сдвиговых колебаний в металле $\gamma t = 45^\circ$, исходя из условий оптимального выявления дефектов, расположенных по всему сечению стенки трубы.

Угол падения ультразвуковой волны на границу вода-сталь для получения сдвиговой волны с углом $\gamma t = 45^\circ$ равен

$$\sin \alpha = \frac{C_{ст}}{C_{в}} \sin \gamma t$$

Для эффективного контроля, помимо выбора соответствующего угла ввода, важен способ создания акустического контакта между преобразователем и трубой. На ОАО «Тагмет» используется бесконтактный способ ввода ультразвуковых колебаний, так как на установке ультразвукового контролю подвергаются кроме гладких труб также и трубы с высадкой внутри. Для обеспечения ввода ультразвуковых колебаний в трубу, применён иммерсионный вариант с локальной ванной, который является наиболее удобным для автоматизированного контроля [3].

Применение этого способа позволяет сочетать преимущества иммерсионного и щелевого способа, а именно:

- 1) контролю могут подвергаться трубы с черновой поверхностью, а также имеющие высадку;
- 2) обеспечивается постоянство акустического контакта между преобразователем и трубой;
- 3) при изменении диаметра контролируемой трубы не требуется смена преобразователя, а производится только его регулировка под требуемый диаметр;
- 4) исключается применение громоздкой иммерсионной ванны с механизмами загрузки и выгрузки;
- 5) упрощается механическая часть установки, так как не требуется автоматического подведения и отвода датчиков;
- 6) повышается надёжность работы преобразователя за счёт того, что преобразователь может быть отнесён от поверхности трубы на достаточно большое расстояние.

2. Выбор параметров пьезоэлектрического преобразователя. На рис. 4 показан ввод ультразвуковых колебаний при контроле иммерсионным способом.

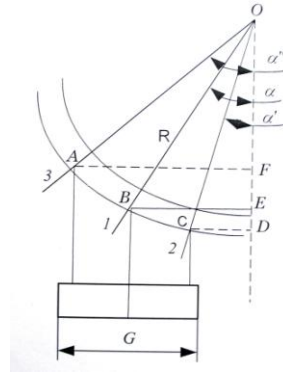


Рис. 4. Схема ввода ультразвуковых колебаний при контроле иммерсионным способом

Расстояние от центра трубы до центра излучателя для обеспечения требуемого угла ввода (L) определяется уравнением [4]

$$L = \frac{D}{2} \sin \alpha = R \sin \alpha,$$

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

Вследствие кривизны поверхности трубы ультразвуковые лучи, излучённые крайними точками пьезоэлектрического преобразователя, встречают поверхность трубы под углами α' и α'' , отличными от α .

Необходимо выбирать такую ширину преобразователя (G), чтобы крайние лучи не возбуждали в трубе продольной и поверхностной волны:

$$\alpha' = \arcsin \frac{L - \frac{G}{2}}{\frac{D}{2}} \quad \alpha'' = \arcsin \frac{L + \frac{G}{2}}{\frac{D}{2}}.$$

Для обеспечения прозвучивания всего сечения стенки трубы при толщинах стенки до 30 мм выбираем ширину преобразователя равной 10 мм. Определим требуемую длину преобразователя.

Шаг сканирования определяется углом разворота роликов колёсного рольганга Θ . На ОАО «Тагмет» стандартный рольганг термического участка имеет угол разворота роликов $\Theta=8^\circ$. Шаг сканирования A равен

$$A = \pi D \operatorname{tg} \Theta.$$

Следовательно, для обеспечения стопроцентного контроля трубы длина преобразователя «X» не должна быть меньше «A».

На рис.5 показано, как длину преобразователя можно уменьшить, если установить зону контроля определённой протяжённости.

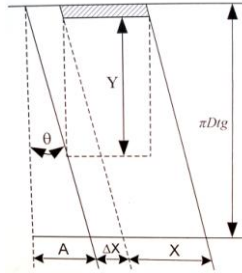


Рис. 5. Схема установки ультразвукового контроля труб

Увеличение ширины захвата преобразователя определяется по формуле

$$\Delta X = Y \operatorname{tg} \Theta.$$

Для обеспечения перекрытия всей поверхности трубы необходимо выполнить следующее условие:

$$A \leq X + \Delta X; \quad \pi D \operatorname{tg} \Theta \leq X + Y \operatorname{tg} \Theta; \quad X \geq \operatorname{tg} \Theta (\pi D - Y).$$

Выражение даёт связь между длиной преобразователя (X) и величиной зоны контроля (Y).

3. Проверка электроакустического тракта дефектоскопа. Рабочая частота контроля при ультразвуковой дефектоскопии выбирается исходя из условия уменьшения уровня структурных шумов и повышения разрешающей способности к дефектам. Как указано в работе [5], для уменьшения уровня структурных шумов необходимо, чтобы длина ультразвуковой волны в металле $\lambda \geq (10:15)D$, 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.

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

Величина собственной емкости определяется формулой

$$C = \frac{E_0 \cdot E \cdot S_a}{d},$$

где E_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; S_a – площадь пьезопластины; d – толщина пьезоэлемента, колеблющегося на собственной частоте по толщине.

Емкость преобразователя, обеспечивающего 100 %-ный контроль трубы, равна

$$C = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \times 1,5 \cdot 10^3 \times 600 \cdot 10^{-6}}{0,72 \cdot 10^{-3}} = 11 \cdot 10^3 \text{ Пф.}$$

Для возбуждения преобразователя с такой большой емкостью требуется генератор с очень мощным выходом. Целесообразно разделить преобразователь на две части, соответственно использовать два канала контроля. Уменьшить длину преобразователя также целесообразно для улучшения выявляемости дефектов небольшой протяжённости.

Для обеспечения выявления дефекта должно выполняться условие:

$$\frac{v'}{v_0} > \frac{v_{min}}{v_0},$$

где v' – амплитуда электрического сигнала на входе усилителя дефектоскопа; v_0 – амплитуда электрического сигнала генератора дефектоскопа; v_{min} – минимальный сигнал, регистрируемый усилителем дефектоскопа. Величину v_{min}/v_0 можно назвать порогом электрической чувствительности дефектоскопа.

$$\frac{v'}{v_0} = v v' (\nu, z, a, \lambda, \sigma),$$

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

$$v \cdot v' = \frac{2e^2 \cdot Sa}{d^2 \cdot c \cdot \rho} |Za \cdot \nu^2| \cdot F^2,$$

где e – пьезоконстанта преобразователя; Sa – площадь преобразователя; d – толщина преобразователя; $C \cdot \rho = Z$ – акустическое сопротивление материала, в который происходит излучение; Za – входной импеданс усилителя; ν – функция, учитывающая резонансные свойства электрического контура генератора; F – функция, определяющая связь преобразователя с трубой. Функция определяется согласованием пьезоискателя с генератором и усилителем, при настройке электрического контура, в который входит преобразователь, в резонансе на частоте, соответствующей частоте собственных колебаний пьезоэлемента. $Za \nu^2 \approx R_c$, где R_c – 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.

Определим индуктивность контура генератора из формулы

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль металлов: Справочник. – М.: Металлургия, 1991.
2. Ермолов И.Н. Методы ультразвуковой дефектоскопии: Курс лекций. Ч. I. – М.: Горный институт, 1966.
3. Мульчин В.В., Фартушный Р.Н., Ясаев Р.А., Козьев В.Г. и др. Способ автоматизированного неразрушающего контроля качества труб и устройство для его осуществления. Патент РФ на изобретение № 2351925. Бюл. № 10, 2009.
4. Неразрушающий контроль и диагностика» справочник / Под ред. член-корр. РАН проф. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995.
5. Шрайбер Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Металлургия, 1965.

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

Иванов Алексей Николаевич – ОАО «Тагмет»; e-mail: al_013@mail.ru; г. Таганрог, ул. Кузнечная, 13, кв. 3; тел.: 89054568876, 89515368406; инженер.

Тимошенко Владимир Иванович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: ega@fer.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Ivanov Alexei Nikolayevich – PJSC “TAGMET”; e-mail: al_013@mail.ru; 3, Kuznechnaya street, ap. 13, Taganrog, Russia; phone: +79054568876, +79515368406; engineer.

Timoshenko Vladimir Ivanovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ega@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of hydroacoustic and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 534.29: 551.594.25

В.И. Тимошенко, Н.Н. Чернов, М.А. Лупандина

МАКРОПРОЦЕСС АКУСТИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ДЫМОВ

Рассматриваются закономерности макропроцесса (кинетики) акустической коагуляции и осаждения высокодисперсных аэрозолей в акустическом поле. Теоретически и экспериментально показано, что под действием мощного акустического поля происходит экспоненциальное изменение счётной концентрации мелкодисперсных частиц промышленных дымов. Приведено экспериментально полученное уравнение для возгонного дыма металлургического производства. Показано, что акустическое осаждение дыма зависит от сочетания параметров: интенсивности звука, концентрации аэрозоля, времени озвучивания и температуры пылегазового потока.

Получено решение уравнения для изменения осаждаемого диффузионного потока наночастиц через акустический и гидродинамический пограничные слои. Показано, что акустическое поле интенсифицирует процесс осаждения наноразмерных аэрозолей.

Акустическая коагуляция; осаждение дымов; аэрозольные частицы; пограничные слои; диффузия.

V.I. Timoshenko, N.N. Chernov, M.A. Lupandina

MACROPROCESS ACOUSTIC PRECIPITATION FINE FUMES

The patterns of macro-process (kinetics) of acoustic coagulation of the fine aerosols in an acoustic field are considered of flow fields of industrial aerosols in an acoustic field to their intensive coagulation is shown. Exponential change in number density of particles of industrial fumes occurring under the influence of a powerful acoustic field is shown theoretically and experimentally. Experimentally driven regression equation for smoke of steel production is given. Acoustic deposition of smoke depends on a combination of various parameters such as sound intensity, concentration of aerosol time scoring, temperature dust and gas flow.

The solution for changing the deposition of the diffusion flux of nanoparticles through the acoustic and hydrodynamic boundary layers is obtained. An acoustic field intensifies the process of deposition of nanoscale aerosols.

Acoustic coagulation; sedimentation fumes; aerosol particles; boundary layers; diffusion.

Экспериментальные исследования макропроцесса (кинетики) акустической коагуляции и осаждения были проведены нами с различными промышленными аэрозолями (около полутора десятков видов) [1, 2, 3]. Везде подтверждалась модель экспоненциального изменения во времени счётной концентрации N частиц. Например, для возгонных аэрозолей конвертерного производства стали с аэрозольными частицами, медианный размер которых по счёту составлял 0,2 мкм, методом регрессионного анализа получено экспериментальное уравнение кинетики процесса акустической коагуляции в виде

$$\frac{N}{N_0} = \exp(-1,04 - 0,098c_g + 0,007c_g^2 + 0,0045c_g f - 0,056c_g T_{036} - 0,0077Tf - 0,026fT_{036} + 0,098T_{036}^2). \quad (1)$$