



# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ВОЛН С НЕСПЛОШНОСТЯМИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

А. И. БОНДАРЕНКО

*Рассмотрены основные особенности возбуждения и закономерности распространения низкочастотных направленных волн продольной и крутильной мод в протяженных трубопроводных системах. Исследованы механизмы отражения и прохождения направленных волн на границе изменения сечения трубы и выявления несплошностей различного рода в трубопроводах.*

*The paper deals with the main features of excitation and regularities of propagation of low-frequency directional waves of the longitudinal and torsional modes in extended pipeline systems. The mechanisms of reflection and propagation of directional waves on the boundary of the pipe cross-section change and detection of various discontinuities in pipelines have been studied.*

Трубопроводные системы (трубопроводы) являются одними из самых распространенных видов сварных конструкций и находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Проблема определения технического состояния трубопроводов остро стоит во всех странах мира. Обеспечение работоспособности и безопасности эксплуатации протяженных трубопроводов является одной из главных задач технической диагностики с использованием средств неразрушающего контроля (НК). Однако возможности контроля и диагностики таких конструкций обычными средствами весьма ограничены. В то же время следует периодически проводить мониторинг технического состояния протяженных трубопроводов для выявления критических дефектов, к которым в трубопроводах относятся прежде всего деформации формы сварных швов и нарушения сплошности стенок труб, вызванных коррозией. Коррозия может возникать как на внутренней поверхности трубы, так и на наружной. Из-за большого количества находящихся в эксплуатации трубопроводных систем различного назначения использование обычных средств НК весьма ограничено.

Для решения проблемы контроля и диагностики технического состояния труб и трубопроводов путем обнаружения дефектов коррозии и других дефектов потери металла в течение более десяти последних лет развиваются технологии и технические средства, основанные на методе дальнего действия низкочастотного ультразвукового контроля (НЧ УЗК) направленными волнами [1–3]. Особенности распространения НЧ УЗ направленных волн, обзор систем НЧ ультразвукового контроля трубопроводов на основе использования различных видов преобразователей приведен в работе [4].

**Особенности возбуждения направленных волн в трубопроводах.** В процессе возбуждения в про-

тяженном трубопроводе направленных волн последний действует как бесконечный волновод. При использовании в системах НЧ УЗК пьезопреобразователей возбуждение направленных волн осуществляется от кольца преобразователей, закрепленных равномерно вокруг трубы. Так как в таких системах используют низкие частоты в диапазоне выше слышимых частот, то нет необходимости в применении контактной жидкости между преобразователями и поверхностью трубы, а хороший ультразвуковой контакт обеспечивается с помощью приложения механического или пневматического постоянного давления к задней стенке поверхности преобразователей для поддержания контакта с поверхностью трубы. Расположение датчиков на равном расстоянии по окружности трубы позволяет вырабатывать направленные волны, которые распространяются симметрично вокруг оси трубы и обеспечивают равномерное распределение колебаний по всему ее сечению. Визуально распространение направленных волн можно представить в виде кольцевой волны, которая проходит вдоль трубы по всему сечению и взаимодействует с поперечным сечением трубы в каждой точке. Это и позволяет технологии НЧ УЗК быть чувствительной к различного рода несплошностям в трубопроводных системах.

Для контроля технического состояния трубопроводных систем НЧ УЗК направленными волнами используют две моды волн: продольную и крутильную. Существенной особенностью этих волн является минимальная дисперсия их групповых скоростей в определенных диапазонах частот ультразвуковых волн. Исходя из приведенных в работе [2] диаграмм зависимостей групповых скоростей направленных волн, для реализации технологии контроля протяженных трубопроводов целесообразно использование симметричной продольной моды нулевого порядка  $L(0,1)$  или  $L(0,2)$  в



области минимальной дисперсии скорости либо недисперсионной нулевой крутильной моды  $T(0,1)$ . При этом затухание продольной моды направленных волн невелико и обусловлено только внутренними потерями в материале трубы, а затухание крутильной волны вообще отсутствует. Так, затухание направленной волны продольной моды, обусловленное внутренними потерями в металле на низкой частоте, составляет  $\delta = 0,008$  1/м, что обеспечивает возможность обнаружения дефектов на больших расстояниях [5]. Благодаря волновым свойствам протяженных трубопроводов (намного больше длины волны), в них возникают качественно иные закономерности распространения НЧ УЗ направленных волн и механизмы их взаимодействия с несплошностями различного рода, реальные размеры которых часто меньше длин излучаемых волн. Механизмы взаимодействия НЧ УЗК направленных волн с несплошностями труб обусловлены процессами отражения и прохождения волн на границе изменений поперечного сечения трубы, которые возникают вследствие наличия в трубопроводах сварных соединений, коррозионных поражений и т. п. симметричных и асимметричных отражателей.

**Основные закономерности распространения направленных волн в трубопроводах.** При рассмотрении закономерностей распространения продольной и крутильной мод направленных волн по сечению трубы будем считать, что ее материал является однородной изотропной средой. Если на трубу действует внешнее воздействие в виде продольных или крутильных колебаний, изменяющихся во времени, то в ней возникает волновое движение, в результате которого возмущение (деформация) передается от одних участков трубы к другим с конечной скоростью.

При распространении по сечению трубы направленной волны продольной моды  $L(0,1)$  и  $L(0,2)$  в области минимальной дисперсии вызывает продольные деформации труб, которые являются однородными по ее сечению и представляют собой простые растяжения и сжатия в виде смещения частиц среды в каждой произвольной точке внутри стенки трубы вдоль ее продольной оси  $z$  и небольшими поперечными смещениями. В этом случае уравнение продольных колебаний трубы может быть записано в виде уравнения плоской волны, так как волновые поверхности продольных деформаций трубы в виде растяжения и сжатия частиц среды представляют собой совокупность плоскостей, параллельных друг другу. Представление о распределении продольных деформаций в виде сдвига частиц среды трубы при распространении направленной волны продольной моды приведено в работе [4].

Уравнение продольных колебаний для плоской волны можно записать дифференциальным уравнением в частных производных вида [6]

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} - \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где  $u_z$  — величина смещения частиц среды трубы по оси  $z$ ;  $C_0$  — скорость распространения продольной волны в трубе.

Скорость продольной волны определяется по выражению

$$C_0 = \sqrt{E/\rho}, \quad (2)$$

где  $E$  — модуль Юнга;  $\rho$  — плотность среды (материала трубы).

Решением волнового уравнения (1) в случае гармонических волн с круговой частотой  $\omega$  будет [7]

$$u(z,t) = A \cos(kz - \omega t + \varphi_1) + B \cos(kz + \omega t + \varphi_2), \quad (3)$$

где  $A, B$  — амплитуды волн;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — начальные фазы волн;  $z$  — текущее значение продольной координаты трубопровода;  $t$  — время;  $k$  — волновое число ( $k = 2\pi/\lambda$ , где  $\lambda = 2\pi C_0/\omega = TC_0$  — длина волны,  $T$  — период волны).

Первый член уравнения (3) описывает волну, распространяющуюся в сторону положительных  $z$ , второй — в обратном направлении.

При распространении по сечению трубы направленной волны крутильной моды  $T(0,1)$ , которая является аналогом поперечной волны в пластинах, вызывает только одну азимутальную компоненту смещения частиц среды трубы относительно ее продольной оси, т. е. представляет собой поворот поперечного сечения трубы как целого на некоторый угол. Представление о распределении крутильных колебаний в виде азимутальной компоненты смещения частиц трубы при распространении направленной волны крутильной моды приведено в работе [4].

Уравнение движения трубы, совершающей крутильные колебания, может быть записано дифференциальным уравнением в частных производных вида [6]

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \frac{1}{C_T^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0, \quad (4)$$

где  $\varphi$  — угол поворота сечения трубы вокруг ее оси инерции;  $C_T$  — скорость распространения крутильной волны в трубе.

Волновое уравнение (4) для крутильных колебаний совпадает с уравнением (1) для продольных колебаний с той только разницей, что роль продольного смещения в уравнении (4) играет угол  $\varphi$  поворота сечения при кручении, а вместо модуля  $E$  нужно ввести модуль сдвига  $\mu$  с новым значением скорости  $C_T$  распространения волны.

Известно [6], что скорость крутильной волны  $C_T$  определяется крутильной жесткостью  $D$ , моментом инерции  $I$  и плотностью среды  $\rho$

$$C_T = \sqrt{\frac{D}{\rho I}}. \quad (5)$$

Крутильная жесткость  $D$  определяется по формуле

$$D = \mu I_K, \quad (6)$$

где  $I_K$  — момент инерции при кручении (или условный момент инерции);  $\mu$  — модуль сдвига.

Тогда с учетом выражений (5) и (6) формула для определения скорости крутильной волны  $C_T$  будет иметь вид:

$$C_T = \sqrt{\frac{D}{\rho I}} = \sqrt{\frac{\mu I_K}{\rho I}}. \quad (7)$$

Для трубы круглого сечения при отсутствии дефекта момент инерции сечения  $I$  и момент инерции при кручении  $I_K$  равны и выражаются формулой

$$I = I_K = \pi (r_H^4 - r_B^4) / 2, \quad (8)$$

где  $r_H, r_B$  — соответственно наружный и внутренний радиусы трубы.

При этом скорость крутильной волны максимальна и равна скорости поперечной волны  $C_t$

$$C_T = \sqrt{\frac{D}{\rho I}} = \sqrt{\frac{\mu I_K}{\rho I}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = C_t. \quad (9)$$

Наличие в трубе малого дефекта типа утонения стенки приводит к уменьшению крутильной жесткости  $D$ , при этом изменение момента инерции  $I$  сечения незначительно и его можно принять  $I = \text{const}$ . Поэтому скорость крутильной волны  $C_T$  может быть найдена по формуле

$$C_T = \sqrt{\frac{\mu I_K}{\rho I}} = C_t \sqrt{\frac{I_K}{I}}. \quad (10)$$

Для определения крутильной жесткости  $D$  трубы, находящейся под действием крутящего момента, с дефектом типа утонения (уменьшения толщины) стенки трубы со стороны ее внутренней поверхности воспользуемся геометрической моделью крутильной жесткости трубы, приведенной

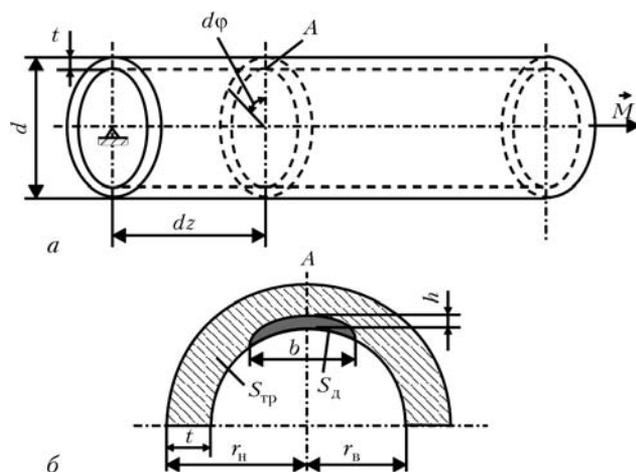


Рис. 1. Геометрическая модель для расчета крутильной жесткости сечения трубы (а) с дефектом типа утонения стенки (б)

на рис. 1, а. Фрагмент дефекта типа утонения стенки трубы показан на рис. 1, б.

Модель представляет собой закрепленную с одного конца трубу диаметром  $d$ , толщиной стенки  $t$  с дефектом шириной  $b$  вдоль образующей трубы и глубиной  $h$  поражения стенки трубы (модельный дефект). Под действием крутящего момента  $M$  труба поворачивается на относительный угол кручения  $\tau$ , который для произвольного сечения определяется как отношение угла поворота сечения при кручении  $d\phi$  к расстоянию  $dz$  между этим сечением и закрепленным концом трубы

$$\tau = \frac{d\phi}{dz}. \quad (11)$$

Крутильная жесткость  $D$  выражает связь между крутящим моментом  $M$  и относительным углом кручения  $\tau$

$$D = \frac{M}{\tau} = \frac{M dz}{d\phi}. \quad (12)$$

При расчете крутильной жесткости  $D$  дополнительно необходимо задавать упругие свойства материала трубы (плотность  $\rho$ , модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ ).

Практический интерес при использовании направленной волны крутильной моды  $T_0$  может представлять зависимость скорости  $C_T$  от глубины  $h$  поражения стенки вдоль образующей трубы. Наличие больших коррозионных поражений уменьшает момент инерции трубы при кручении  $I_K$ , что может привести к значительному уменьшению скорости распространения направленной волны крутильной моды.

**Механизм отражения и прохождения направленных волн.** Механизм отражения и прохождения НЧ направленной волны в протяженном трубопроводе базируется на принципе взаимодействия падающей ультразвуковой волны с участком изменения поперечного сечения трубы вследствие наличия в трубопроводе разного рода несплошностей.

Проанализируем в общем виде процессы отражения и прохождения направленных волн на границе перехода одного волновода сечения  $S_1$  к достаточно длинному второму волноводу сечения  $S_2$ . Будем считать границу перехода волноводов как неразъемный абсолютно жесткий контакт двух труб с различными материальными постоянными  $\rho_1, E_1$  и  $\rho_2, E_2$  для направленной волны продольной моды и материальными постоянными  $\rho_1, \mu_1$  и  $\rho_2, \mu_2$  для крутильной моды. Принцип отражения и прохождения направленных волн на границе волноводов с разными сечениями показан на фрагменте трубопровода с разными внутренними диаметрами труб, который приведен на рис. 2, где  $t_1, r_{B1}$  и  $t_2, r_{B2}$  — толщины стенок и внутренние радиусы первой и второй трубы соответственно;  $r_H$  — наружный радиус труб.



При распространении направленной волны по участку трубопровода с площадью поперечного сечения  $S_1$  падающая ультразвуковая волна амплитуды  $A_1$  встречает на своем пути другой трубопровод, площадь поперечного сечения которого составляет  $S_2$ . При этом падающая волна преобразуется в отраженную, амплитуда  $B_1$  которой зависит от степени изменения поперечного сечения трубы, и в прошедшую с амплитудой  $A_2$ , которая распространяется дальше по сечению трубы.

Процессы отражения и прохождения волн зависят от свойств границы, т. е. от граничных условий. Предполагая, что граница перехода сечений расположена при  $z = z_0$ , граничными условиями для направленной волны продольной моды будет равенство справа и слева от границы смещений и сил (напряжений)  $F$ :

$$u_1 \Big|_{z=z_0} = u_2 \Big|_{z=z_0}; \quad F_1 \Big|_{z=z_0} = S_1 E_1 \frac{\partial u_1}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = F_2 \Big|_{z=z_0} = S_2 E_2 \frac{\partial u_2}{\partial z} \Big|_{z=z_0}, \quad (13)$$

а для крутильной моды — равенство углов поворота сечений и крутильных моментов  $M$ :

$$\varphi_1 \Big|_{z=z_0} = \varphi_2 \Big|_{z=z_0}; \quad M_1 \Big|_{z=z_0} = \mu_1 I_{к1} \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = M_2 \Big|_{z=z_0} = \mu_2 I_{к2} \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \Big|_{z=z_0}. \quad (14)$$

Так как образование отраженной волны происходит на участке изменения площади поперечного сечения трубы, то при рассмотрении процессов распространения акустических волн в волноводах пользуются понятием акустического импеданса  $Z$ , зависящего как от параметров волновода (площади его сечения  $S$ ), так и от свойств среды — скорости звука  $C$  и плотности  $\rho$ . Акустический импеданс по сути показывает степень сопротивления трубы распространению ультразвуковых направленных волн. На рис. 2 показан простейший случай перехода от первой трубы с акустическим импедансом  $Z_1 = \rho_1 C_1 S_1$  к достаточно длинной трубе с акустическим импедансом  $Z_2 = \rho_2 C_2 S_2$ .

Коэффициент отражения  $R$  по амплитуде от скачка акустического импеданса будет определяться по формуле, которая аналогична формуле Рэлея [8] для плоской волны, отраженной при нормальном падении от границы раздела двух полубесконечных сред с различными акустическими импедансами (акустическими сопротивлениями) при отсутствии затухания:

$$R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{\rho_1 C_1 S_1 - \rho_2 C_2 S_2}{\rho_1 C_1 S_1 + \rho_2 C_2 S_2} = \frac{S_1 \sqrt{\rho_1 E_1} - S_2 \sqrt{\rho_2 E_2}}{S_1 \sqrt{\rho_1 E_1} + S_2 \sqrt{\rho_2 E_2}}. \quad (15)$$

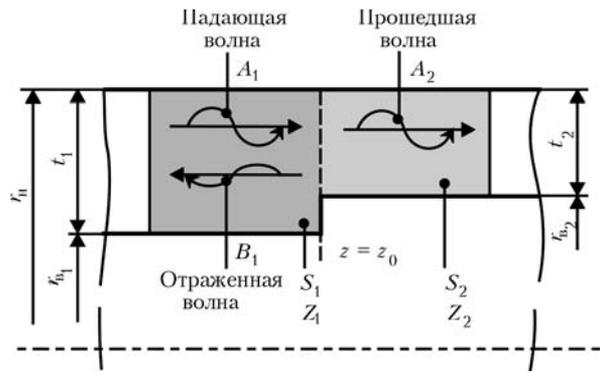


Рис. 2. Принцип отражения и прохождения направленных волн на границе изменения сечения трубы

Коэффициент прохождения  $W$  по амплитуде от скачка акустического импеданса будет определяться по формуле [7]

$$W = \frac{2S_1 \sqrt{\rho_1 E_1}}{S_1 \sqrt{\rho_1 E_1} + S_2 \sqrt{\rho_2 E_2}}. \quad (16)$$

Таким образом, в соответствии с закономерностями распространения акустических волн в волноводах в основу механизма выявления дефектов в трубопроводах можно положить процесс отражения падающей волны от дефектного участка трубы, связанный с изменением акустического импеданса трубы  $Z = \rho CS$ . Это позволяет использовать выражение (15) для определения коэффициента отражения направленной волны от дефектов в трубопроводе.

Так как распространение направленной волны согласно рис. 2 происходит в направлении уменьшения поперечного сечения трубы ( $S_2 < S_1$ ), то наблюдается смена фазы отраженного эхо-сигнала, что аналогично случаю нормального отражения плоской волны от плоской границы раздела сред при переходе от акустически более жесткой среды к акустически более мягкой ( $\rho_2 C_2 < \rho_1 C_1$ ) [8]. При этом частоты падающей и отраженной волны равны во всех случаях, что значительно облегчает решение задач об отражении направленной волны. Из рис. 2 также следует, что если отраженные волны образуются на участке изменения площади поперечного сечения трубы, то скачок поперечного сечения трубы можно обнаружить независимо от его расположения (со стороны внутренней или наружной поверхности трубы).

**Особенности механизма отражения и прохождения волн от несплошностей в трубопроводе.** Отражение волн является следствием реакции на динамические нагрузки, возникающие при распространении направленной волны. Такими динамическими нагрузками в протяженных трубопроводах являются сварные соединения труб, различные фланцы и т. п. симметричные отражатели, а также дефекты типа коррозионного поражения стенки трубы, которые являются асимметричными отражателями. Если при движении волна доходит до изменения толщины стенки трубы, связанной



как с уменьшением сечения при наличии коррозии, так и с увеличением сечения при наличии усиления сварного шва, определенная часть энергии волны отражается назад к преобразователям. Амплитуды отраженного сигнала определяются размером дефекта, т. е. площадью пораженного дефектом поперечного сечения трубы. Принцип соответствия амплитуды эхо-сигнала величине дефекта положен в основу создания систем УЗК трубопроводов низкочастотными направленными волнами. Кроме того, ширина эхо-сигнала также соответствует величине дефекта. С увеличением размеров дефекта увеличивается длительность (ширина) эхо-сигнала.

Учитывая выражения (15) и (16), рассмотрим возможность их применения для определения коэффициентов отражения  $R$  и прохождения  $W$  в трубопроводах на границе перехода к достаточно длинному поражению стенки трубы вдоль ее образующей и незначительному поражению по толщине стенки трубы вдоль ее окружности.

При использовании направленной волны продольной моды  $L(0,1)$  и  $L(0,2)$  наличие в стенке трубы незначительного коррозионного поражения, приводящего к утонению ее стенки, в общем случае не приводит к изменению плотности  $\rho$  металла и скорости  $C$  распространения ультразвуковой волны, т. е. свойства материала трубы не меняются и произведение  $\rho C = \text{const}$ . Поэтому при использовании для контроля трубы направленной волны продольной моды появление подобных дефектов не приводит соответственно к изменению скорости  $C_0$  при ее распространении в трубе. В этом случае коэффициенты отражения  $R$  и прохождения  $W$  волны на дефектном участке стенки трубы будут зависеть только от перепада поперечного сечения трубы, приводящего к потере некоторой части металла.

Приравняв в выражениях (15) и (16)  $\rho_1 E_1 = \rho_2 E_2$ , получаем формулы для определения коэффициента отражения

$$R = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \quad (17)$$

и коэффициента прохождения

$$W = \frac{2S_1}{S_1 + S_2} \quad (18)$$

для направленной волны продольной моды при наличии дефектов в протяженных трубопроводах.

Выражение (17) аналогично выражению для определения коэффициента отражения для случая перехода плоской волны из волновода сечения  $S_1$ , в волновод сечения  $S_2$  при незначительном различии сечений волноводов [9], что подтверждает возможность выявления направленными волнами незначительных коррозионных поражений стенки трубы.

При проведении контроля трубопроводов с использованием направленной волны крутильной моды ее поведение при распространении будет отличаться от поведения волны продольной моды. Наличие начальной стадии дефектов типа утонения стенки в трубах не приводит к изменению плотности  $\rho$  металла, а также практически не меняет площадь поперечного сечения  $S$  трубы. В то же время это может привести к изменению скорости  $C_T$  крутильной моды направленной волны. Тогда для этого случая формула (15) для определения коэффициента  $R$  отражения имеет вид:

$$R = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}. \quad (19)$$

Если принять во внимание, что при использовании направленной волны крутильной моды отражение от дефекта, сопровождающееся изменением поперечного сечения трубы с  $S_1$  на  $S_2$ , происходит как вследствие уменьшения поперечного сечения трубы, так и уменьшения скорости ее распространения, то коэффициент  $R$  отражения от дефектного участка трубы может быть рассчитан по формуле

$$R = \frac{S_1 C_1 - S_2 C_2}{S_1 C_1 + S_2 C_2}. \quad (20)$$

Однако, несмотря на зависимость скорости крутильной моды направленной волны от параметров дефектов трубы, при прочих равных условиях крутильная волна отличается более высокой чувствительностью к дефектам, чем продольная волна, и не является дисперсной. Если учитывать положение, что направленные волны продольной и крутильной мод используются для выявления дефектов, которые находятся в начальной стадии их зарождения (до 10 % потери металла в поперечном сечении трубы), то можно не учитывать уменьшение скорости распространения волны крутильной моды. Это позволяет применять выражение (17) для определения коэффициента отражения  $R$  при выявлении дефектов направленными волнами продольной и крутильной мод.

**Механизм отражения сигналов от дефектов ограниченной длины.** Приведенный выше анализ особенностей механизма отражения и прохождения волн в трубопроводах позволяет определять в общем виде коэффициенты отражения  $R$  и прохождения  $W$  направленной волны продольной и крутильной моды при условии изменения поперечного сечения трубы без учета протяженности дефектов вдоль оси трубопровода. Однако как симметричные отражатели, которыми являются сварные соединения, так и асимметричные отражатели в виде коррозионных дефектов имеют обычно ограниченную длину вдоль образующей трубы. Рассмотрим механизмы выявления дефектов, которые имеют ограниченную длину  $l$  в направлении оси (образующей) трубы. Для этого воспользуемся

моделью участка трубы, приведенной на рис. 3, где  $l$  — длина пораженного дефектом участка трубы с площадью поперечного сечения  $S_2$ ,  $h$  — глубина поражения дефектом сечения трубы (утонения стенки трубы).

Если изменение сечения трубы происходит на ограниченной длине трубопровода, что имеет место в большинстве случаев коррозионных дефектов, то скачок акустического импеданса трубопровода на ограниченной длине может быть смоделирован формулами коэффициента отражения и передачи энергии из одного волновода в другой при наличии промежуточного волновода длиной  $l$  [10]. Коэффициент отражения при наличии промежуточного волновода длиной  $l$  может быть найден по аналогии с коэффициентом отражения для плоского тонкого слоя толщиной  $l$ , где вместо волновых сопротивлений сред необходимо подставить эквивалентные им для случая протяженного волновода акустические импедансы дефектного и бездефектного волновода [10]. Тогда коэффициент отражения по амплитуде для скачка акустического импеданса от дефекта ограниченной длины в трубопроводе можно определить по выражению

$$R = \frac{(Z_1^2 - Z_2^2) \sin(\omega l / C)}{\sqrt{4Z_1^2 Z_2^2 + (Z_1^2 - Z_2^2)^2 \sin^2(\omega l / C)}}, \quad (21)$$

где  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота волны;  $C$  — скорость используемой направленной волны.

Так как акустическое сопротивление  $\rho C$  трубопровода не меняется, то скачок поперечного сечения трубы с  $S_1$  на  $S_2$  на ограниченной длине  $l$  может быть выражен следующей формулой для коэффициента отражения по амплитуде:

$$R = \frac{(S_1^2 - S_2^2) \sin(\omega l / C)}{\sqrt{4S_1^2 S_2^2 + (S_1^2 - S_2^2)^2 \sin^2(\omega l / C)}}. \quad (22)$$

Анализ формулы (22) показывает, что коэффициент отражения  $R$  по амплитуде является гармонической функцией параметра  $\omega l / C$ . Так как скорости продольной и крутильной мод для выбранного материала трубы являются фиксированными, то максимум коэффициента отражения будет при значении  $\sin(\omega l / C) = 1$ . Условию максимума коэффициента отражения будет соответствовать пораженный дефектом участок трубы длиной  $l = (2n - 1)\frac{\lambda}{4}$ , где  $\lambda$  — длина волны в материале трубы;  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Минимум коэффициента прохождения будет иметь место при длине пораженного участка трубы  $l = n\frac{\lambda}{2}$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Это значит, что длинные дефекты в трубах низкочастотными направленными волнами не могут быть выявлены. При значении  $l = n\frac{\lambda}{2}$  отражение будет равно нулю. Строго говоря, выражение (22) спра-

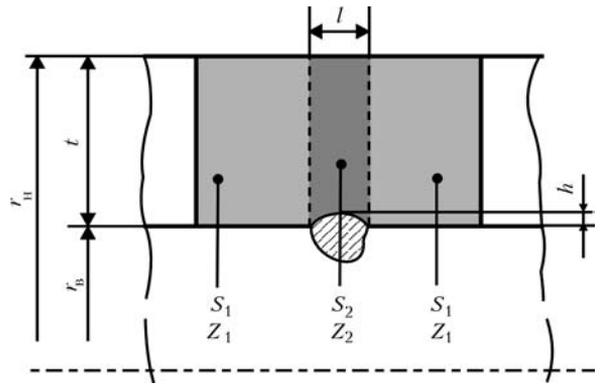


Рис. 3. Модель пораженного дефектом участка вдоль оси трубы

ведливо при возбуждении в трубе синусоидальных колебаний и позволяет вычислять амплитуды отраженных сигналов от дефектов длиной  $l$ . При возбуждении импульсных сигналов направленной волны с несущей частотой синусоидального сигнала формула  $R(\omega)$  будет представлять собой передаточную амплитудно-частотную функцию процесса отражения эхо-сигналов от дефектов. Для расчета импульса отраженной волны во временной области может быть использован метод интеграла Фурье. Поэтому, исходя из задачи выявления дефектов направленными волнами, длина  $l$  протяженных дефектов в обоих случаях должна быть не более  $l = \frac{\lambda}{4}$ . Такие несплошности труб как

симметричные отражатели типа сварных соединений и асимметричные типа коррозионных поражений стенки трубы, как правило, имеют протяженность  $l < \lambda/4$ . В таблице приведены значения  $l = \frac{\lambda}{4}$  в зависимости от частоты продольной и крутильной мод направленной волны, при которых коэффициент отражения  $R$  будет достигать максимума.

В работе [11] приведены результаты расчета коэффициента отражения  $R$  от протяженности несплошности длиной  $l$  в виде сегментного паза площадью  $20 \text{ мм}^2$  в стальном прутке диаметром  $19 \text{ мм}$  для нулевой продольной моды в гармоническом и импульсном режиме возбуждения направленных волн частотой  $32 \text{ кГц}$ . Результаты расчета показали, что в диапазоне изменения длины паза  $0 < l \leq \frac{\lambda}{4}$  коэффициент отражения  $R$  изменяется

по линейному закону, однако при  $l = \frac{\lambda}{4}$  значение коэффициента отражения  $R$  при использовании импульсного режима возбуждения зондирующего сигнала примерно на  $15\%$  меньше гармонического режима возбуждения сигнала.

**Механизм отражения сигналов от сварных швов.** Кольцевые сварные швы, представляющие собой односторонние стыковые соединения кромок труб одинаковой толщины, являются основными симметричными отражателями в протяженных трубопроводах. Стыковой шов должен гарантиро-

Предельные значения  $l = \frac{\lambda}{4}$  в зависимости от частоты сигналов для продольной и крутильной мод направленной волны

Мода волны	Скорость распространения волны, м/с	Частота несущего сигнала $f$ , кГц	Длина волны $\lambda$ , мм	Предельные значения $l = \frac{\lambda}{4}$ , мм
Продольная ( $L_0$ )	5000	20	250,0	62,5
		40	125,0	31,25
		60	83,3	20,82
		80	62,5	15,62
		100	50,0	12,5
Крутильная ( $T_0$ )	3250	20	162,5	40,62
		40	81,25	20,3
		60	54,17	13,54
		80	40,62	10,16
		100	32,5	8,125

вать провар металла трубы по всей ее толщине. Поэтому сварка швов трубопроводов чаще всего выполняется в несколько проходов (два и более) в зависимости от толщины стенок свариваемых труб. Первый проход является ключевым для обеспечения качественного провара корня шва, для чего осуществляется подготовка кромок в виде V-образной разделки. Вторым и последующие проходы используются для формирования остальной части сварного шва.

Рассмотрим механизм отражения сигналов направленной волны от кольцевых сварных швов.

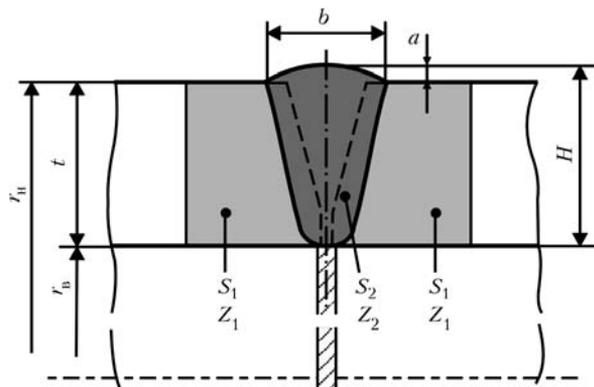


Рис. 4. Модель участка трубы с кольцевым сварным швом:  $a$  – усиление сварного шва;  $b$  – ширина;  $H$  – высота сварного шва

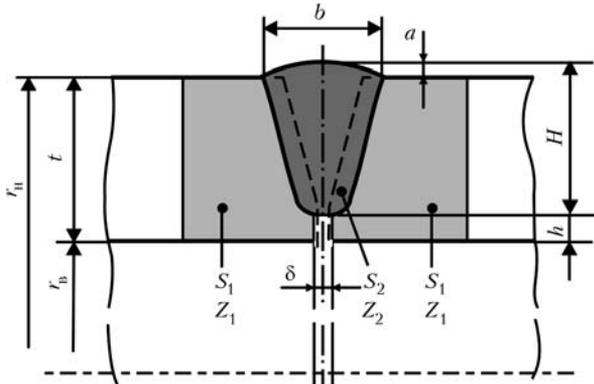


Рис. 5. Модель участка трубы с неполным проваром ее поперечного сечения:  $\delta$  – зазор между кромками труб

На рис. 4 приведена модель участка трубы с кольцевым сварным швом.

Так как сварной шов имеет особую форму сечения и усиления с плавным переходом от шва к основному металлу трубы, то его площадь поперечного сечения  $S_2$  будет отличаться от площади поперечного сечения  $S_1$  трубы. При этом в силу другой структуры металла шва постоянные  $\rho_2$  и  $E_2$  будут отличаться от постоянных  $\rho_1$  и  $E_1$  материала трубы. В этом случае коэффициент отражения  $R$  по амплитуде от сварного шва можно определить из выражения (15) по следующей формуле:

$$R = \frac{S_1 \sqrt{\rho_1 E_1} - S_2 \sqrt{\rho_2 E_2}}{S_1 \sqrt{\rho_1 E_1} + S_2 \sqrt{\rho_2 E_2}} \quad (23)$$

Из опыта использования направленных волн в системах низкочастотного УЗК для диагностики протяженных трубопроводов известно [3], что пока кольцевой сварной шов имеет обычный профиль верхнего и корневого проходов, отражение от него является менее интенсивным, чем отражение от конца трубы. Это положение хорошо подтверждается на практике, пока существуют небольшие отклонения размеров шва к шву. При наличии в трубопроводе большого количества нормально сваренных швов эхо-сигналы от кольцевых швов будут постепенно затухать с расстоянием. Поэтому эхо-сигналы от кольцевых сварных швов на трубопроводе, которые постепенно затухают с расстоянием, являются идеальными отражателями для задания кривой корректировки «расстояние–амплитуда», с которой можно сравнивать сигналы от несплошностей в системах низкочастотного УЗК направленными волнами.

Рассмотрим случай неполного провара сечения трубы, модель которого приведена на рис. 5.

Если согласно рис. 5 сварные швы будут сформированы с разной глубиной проплавления стенок соединяемых труб, это будет свидетельствовать об отклонении площади поперечного сечения шва к шву. Чем меньше площадь поперечного сечения шва, тем больше будет отражение сигнала направленной волны от такого шва. При этом будет наблюдаться неравномерное затухание эхо-сигналов от сварных швов с расстоянием в тех случаях, когда сварные швы трубопровода сформированы с разной глубиной провара кромок по сечению трубы. Поэтому по отраженным от сварных швов сигналам можно судить о качестве выполнения сварных соединений труб в трубопроводах. Коэффициент отражения по амплитуде при неполном проваре шва будет также определяться по выражению (23).

### Выводы

Обоснованы основные закономерности распространения низкочастотных ультразвуковых направленных волн продольной и крутильной мод в протяженном трубопроводе как бесконечном волноводе.



На основании исследования общего механизма отражения и прохождения падающей направленной волны на границе изменения поперечного сечения трубы обоснованы механизмы отражения и прохождения ультразвуковой волны при ее взаимодействии с несплошностями типа кольцевых сварных швов и коррозионных поражений стенки трубы. Получены выражения для определения коэффициентов отражения и прохождения волны по амплитуде.

1. Mudge P. J., Lank A. M., Allyne D. N. A long range method of the detection of corrosion under insulation in process pipework. — Thermie Project: OG474/94, 5 th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg, 26–28 Nov., 1996.
2. Report. Long Lange Ultrasonic testing technique — performance details / Document reference: TTP/01. May 2001. — 20 с.
3. Long Lange Ultrasonic test system. Section 1. System Overview and Principles of Operation. — Sept., 2004. — 6 с.

4. Патон Б. Е., Троицкий В. А., Бондаренко А. И. Метод низкочастотного ультразвукового контроля протяженных трубопроводов направленными волнами // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 20–30.
5. Буденков Г. А., Нездвицкая О. В., Далати М. О возможностях акустической дистанционной дефектоскопии протяженных объектов // Дефектоскопия. — 2003. — № 11. — С. 29–33.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. — М.: Наука, 1965. — 204 с.
7. Бреховских Л. М., Гончаров В. В. Введение в механику сплошных сред (в приложении к теории волн). — М.: Наука, 1982. — 335 с.
8. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. — М.: Изд-во иностр. лит., 1957. — 727 с.
9. Скучик Е. Основы акустики / Пер. с англ. — М.: Мир, 1976. — Т. 1. — 520 с.
10. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. — М.: Наука, 1973. — 344 с.
11. Буденков Г. А., Нездвицкая О. В. Основные закономерности взаимодействия волн Похгаммера с дефектами // Дефектоскопия. — 2004. — № 2. — С. 33–46.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
Киев

Поступила в редакцию  
15.09.2008

**8-12 June 2009**  
**Sozopol**

**NDT Days 2009**

**Болгарское общество по НК**  
**Институт механики Болгарской академии наук**  
**Научно-технический союз инженеров-механиков**

приглашает специалистов по неразрушающему контролю  
принять участие в Форуме

**NDT Days 2009**

который состоится **8-12 июня 2009 г. в Созополе, Болгария**

**В рамках Форума будут проходить:**

- 24-я Национальная конференция «Дефектоскопия '08»
- Болгарско-российский семинар «Диагностика электроэнергетических систем»
- Национальный семинар «Задачи и проблемы НК объектов железнодорожного транспорта»
- Выставка средств для НК и ТД
- Учебный семинар для экзаменаторов органов по сертификации персонала по НК и др. мероприятиям

**Важные даты:**

- до 01.04 — заявки на участие
- до 20.04 — тезисы докладов
- до 10.05 — полные тексты докладов и бронирование гостиницы

**Рабочие языки конференции:** болгарский, русский, английский

Стоимость участия в конференции — 120 Евро  
(после 20.04 — 132 Евро)

Старинный город Созополь расположен в 30 км к югу от Бургаса и является одним из лучших курортов на Черном море с постройками в средневековом стиле.

**Оргкомитет:**

Проф. Митко Миховски, Александр Алексиев  
Институт механики БАН  
ул. Акад. Г.Бончев, 4  
1113, София, Болгария  
Факс: (+359 2) 870 74 98  
E-mail: nntdd@imbm.bas.bg, nntdd@abv.bg