

## МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 620.179.16

### ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ВАЛОВ

С.Л. Соколов

Национальный университет кораблестроения, пр. Героев Сталинграда, 9, г. Николаев, 54025, тел. (8-0512) 45-59-11, 39-73-48

*Приведені результати розрахунку і аналізу акустичного тракту при ультразвуковому контролі швів електронно-променевого зварювання окремих ділянок газотурбінних валів. Виконано експериментальну перевірку розрахункових даних з використанням роздільно-суміщених п'єзоелектричних перетворювачів, що показало їх задовільну сходиність.*

*The results of calculation and analysis of acoustic highway are resulted at ultrasonic control of guy-sutures of the cathode-ray welding of separate areas of gas-turbine billows. An experimental calculation background check is executed with the use of the separately combined piezoelectric transformers, that rotined them satisfactory likeness.*

В настоящее время основным методом контроля сварных соединений деталей газовых турбин является радиография. Недостатки этого метода общеизвестны: низкая чувствительность к плоскостным дефектам, биологическая опасность, низкая оперативность и производительность. Несмотря на то, что ультразвуковой метод контроля (УЗК) превосходит радиографический по целому ряду показателей, до настоящего времени не внедрены эффективные средства УЗК сварных швов газотурбинных деталей. В этой связи, расчет и конструирование акустических преобразователей для УЗК этих соединений является актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций показал, что основной трудностью при УЗК подобных сварных соединений является необходимость выявления в них вертикально ориентированных плоскостных дефектов [1, 2]. Поэтому использование обычных наклонных совмещенных преобразователей неэффективно.

В работе [3] показана целесообразность использования для УЗК этих сварных соединений специализированных раздельно-совмещенных пьезоэлектрических преобразователей (РСПЭП). Преобразователи с такой схемой прозвучивания хорошо зарекомендовали себя при контроле сварных швов тонкостенных труб малого диаметра [4, 5].

В работах [6–8] приведены результаты исследования акустического тракта наклонных преобразователей. Известно, что на акустический тракт существенное влияние оказывают многие факторы: материал контролируемого соединения, его геометрические и акустические характеристики, параметры преобразователей и т.п. В этой связи, необходимым является исследование акустического тракта при ультразвуковом контроле рассматриваемых соединений.

Цель данной работы – расчет и анализ особенностей акустического тракта при ультразвуковом контроле специализированными раздельно-совмещенными преобразователями сварных соединений газотурбинных валов.

Вал турбины состоит из двух деталей, соединение которых производят с помощью электронно-лучевой сварки (ЭЛС). Стык представляет собой соединение замкового типа. Толщина металла в зоне соединения (с подложкой) может достигать 40 мм. Наружный диаметр вала 112-250 мм. Материалом сварных узлов является, как правило, нержавеющая жаропрочная сталь ЭП-609 (07X12НМБФ-Ш).

Как показали исследования, при толщине стенки вала до 10 мм достаточно одного РСПЭП для прозвучивания всего сечения шва. При этом неравномерность чувствительности по высоте сечения шва не превышает 3-4 дБ. При толщине стенки вала более 10 мм чувствительность при

использовании одного РСПЭП значительно снижается, что приводит к необходимости использования двух и более РСПЭП.

Схема контроля сварного соединения вала показана на рис.1. Сварной шов 2 вала диаметром  $D$  контролируют с помощью РСПЭП 1, центральные лучи которых ориентированы перпендикулярно его вертикальной оси. Каждый РСПЭП состоит из излучателя 3 и приемника 4. Количество РСПЭП выбирается в зависимости от толщины контролируемого соединения  $t$  так, чтобы неравномерность чувствительности по высоте шва не превышала 3-4 дБ. Сущность способа заключается в послойном прозвучивании сварного соединения несколькими РСПЭП.

Для расчета акустического тракта использовалась жидкостная модель, которая подробно обоснована в работе [9]. Схема расчета показана на рис.2. Колебания, вводимые в контролируемое изделие излучателем 1,

отражаются от отражателя размером  $2b$  и принимаются приемником 2. Перемещение РСПЭП вдоль шва выполняется по часовой стрелке, если смотреть против направления оси  $OY$ , вокруг которой оно происходит. Текущее значение угла положения отражателя в контролируемой зоне  $\gamma_b$  имеет знак плюс при смещении РСПЭП относительно его нормального положения (положения, когда центр отражателя совпадает с точкой пересечения акустических осей РСПЭП).

На основании работы [10] для упрощения расчетов целесообразно использовать метод "мнимого источника", в соответствии с которым в акустическом тракте действительный источник (приемник) с центром  $O_i$  заменяется мнимым источником (приемником) с центром  $O'_i$ , расположенным на продолжении преломленной оси (рис. 2).

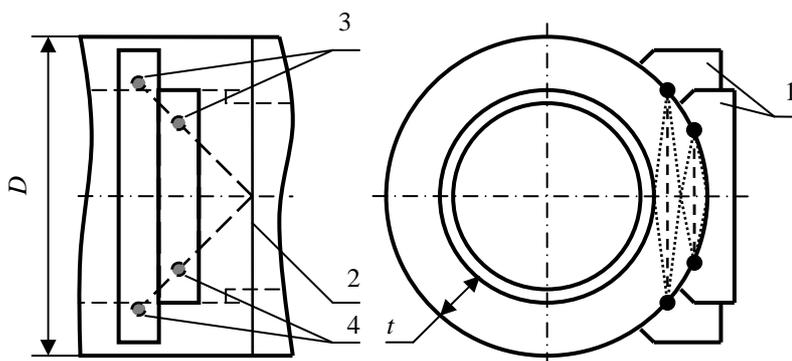


Рисунок 1 – Схема ультразвукового контроля сварных соединений валов

Результаты расчетов, которые будут приводиться ниже, выполнены для валов: диаметром  $D=210$  мм с толщиной стенки  $t=25$  мм, и  $D=132$  мм,  $t=16$  мм.

Контроль вала  $D=210$  мм выполняется с использованием трех РСПЭП. Название каждого РСПЭП соответствует той части шва, которая им прозвучивается (верхняя, средняя или нижняя). Параметры верхнего РСПЭП:  $\alpha=73,4^\circ$ ,  $\gamma=17,8^\circ$ ,  $\Delta=69,5^\circ$ ,  $m=12,0$  мм,  $r=34,2$  мм,  $H_z=100$  мм. Средний РСПЭП:  $\alpha=63,9^\circ$ ,  $\gamma=28,8^\circ$ ,  $\Delta=69,5^\circ$ ,  $m=18,9$  мм,  $r=54,0$  мм,  $H_z=92,0$  мм. Нижний РСПЭП:  $\alpha=55,8^\circ$ ,

$\gamma=36,9^\circ$ ,  $\Delta=69,5^\circ$ ,  $m=23,6$  мм,  $r=67,3$  мм,  $H_z=84,0$  мм.

Контроль вала  $D=132$  мм выполняется с использованием двух РСПЭП. Параметры верхнего РСПЭП:  $\alpha=72,2^\circ$ ,  $\gamma=20,1^\circ$ ,  $\Delta=62,1^\circ$ ,  $m=12,0$  мм,  $r=25,6$  мм,  $H_z=62,0$  мм. Нижний РСПЭП:  $\alpha=60,1^\circ$ ,  $\gamma=34,3^\circ$ ,  $\Delta=62,1^\circ$ ,  $m=19,7$  мм,  $r=42,1$  мм,  $H_z=54,5$  мм.

Контроль выполняется с частотой колебаний 5 МГц и диаметром пьезоэлемента  $2a=6$  мм.

Общее выражение акустического тракта в символическом виде можно записать так:

$$A_{i,j} = A_0 \tilde{D}(\alpha) R Q_i(a, r_i) Q_b(b, r_j) \Phi_i(a, \theta_i) \Phi_j(a, \theta_j) \Phi_b(b, \theta_b) \Psi_i \Psi_j, \quad (1)$$

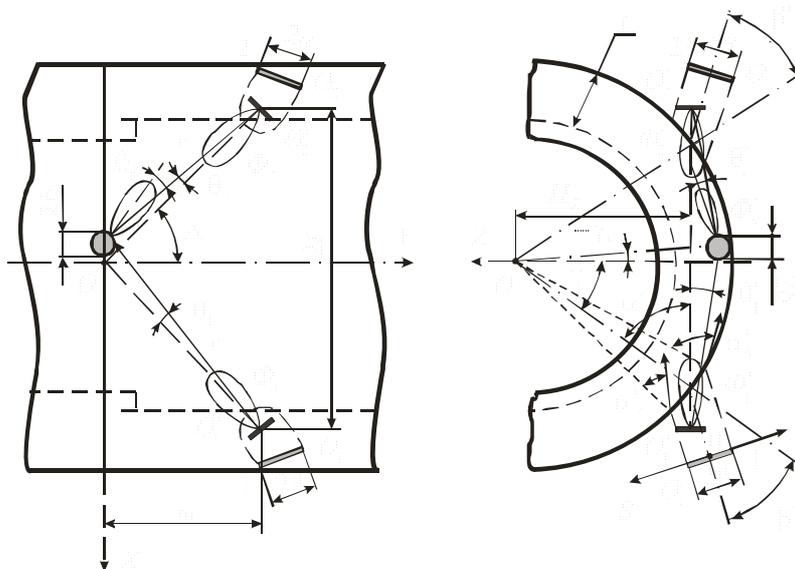


Рисунок 2 – Схема расчета акустического тракта

где  $\tilde{D}$  – коэффициент прозрачности по энергии на границе раздела двух сред;  $R$  – коэффициент отражения от дефекта;  $Q_i$ ,  $Q_b$  – функции, описывающие ослабления сигнала на оси поля излучателя и дефекта соответственно;  $\Phi_i$ ,  $\Phi_b$ ,  $\Phi_j$  – функции, описывающие диаграммы направленности поля излучателя, дефекта и приемника соответственно;  $\Psi_i$ ,  $\Psi_j$  – функции, описывающие затухание колебаний на пути от излучателя до дефекта и от дефекта до приемника соответственно;  $\alpha$  – угол ввода колебаний;  $a$  – радиус пьезоэлемента;  $r_i$ ,  $r_j$  – расстояния по лучам излучателя и приемника соответственно;  $2b$  – размер отражателя;  $\theta_i$ ,  $\theta_j$ ,  $\theta_b$  – углы между направлением на точку наблюдения и осью диаграммы направленности поля излучателя, приемника и дефекта соответственно.

Рассмотрим особенности некоторых функциональных множителей уравнения акустического тракта (1), которые представляют наибольший интерес.

Коэффициент прозрачности  $\tilde{D}$  зависит от угла падения лучей на границу раздела сред и определяется по следующей формуле [11–13]:

$$\tilde{D}(\alpha) = \frac{4Z_1W_2}{(Z_1 + W_1 + W_2)^2 + Z_2^2}, \quad (2)$$

где  $Z_1 = \frac{\rho_1 C_{t1}}{\cos \beta} \cos^2 2\beta_t$ ;

$$Z_2 = \frac{\rho_2 C_{t2} \cos^2 2\alpha}{\sqrt{\left(\frac{C_{t2}}{C_{t1}}\right)^2 \sin^2 \beta - 1}}$$

$$W_2 = \frac{\rho_2 C_{t2}}{\cos \alpha} \sin^2 2\alpha;$$

$$W_1 = \frac{\rho_1 C_{t1}}{\cos \beta_t} \sin^2 2\beta_t;$$

$$\beta_t = \arcsin \frac{C_{t1}}{C_{t2}} \sin \alpha;$$

$$\beta = \arcsin \frac{C_{t1}}{C_{t2}} \sin \alpha; \quad \rho_1 \text{ и } \rho_2 - \text{плотности}$$

материалов призмы и контролируемой среды;  $C_{t1}$  и  $C_{t2}$  – скорости продольных волн в материалах призмы и контролируемой среды;  $C_{t1}$  и  $C_{t2}$  – скорости поперечных волн в материалах призмы и контролируемой среды;  $\beta$  – угол наклона призмы;  $\beta_t$  – угол отражения поперечной волны;  $\alpha$  – угол преломления волны (угол ввода).

При контроле валов граница раздела преобразователь – контролируемое изделие является криволинейной. Поэтому значения углов ввода центральных  $\alpha$  и периферийных лучей  $\alpha_s$  будут различны (рис.2).

По выражению (2) были выполнены расчеты коэффициентов прозрачности при соответствующих значениях углов ввода центральных и периферийных лучей. Результаты расчета для вала  $D=210$  мм приведены на рис.3. Здесь также приведены для сравнения значения углов ввода и коэффициента прозрачности при контроле одним РСПЭП сварного шва трубы  $D=42$  мм,  $t=5$  мм. Видно, что для труб малого диаметра

характерна большая разница значений углов ввода центральных и периферийных лучей, т.е., часть падающих лучей не вводится в контролируемое изделие вследствие того, что углы их падения превышают второй критический. Данная проблема была решена путем использования фокусирующих линз [6, 14]. При контроле вала  $D=210$  мм наибольшая разница значений углов ввода центральных и периферийных лучей наблюдается у верхнего РСПЭП ( $\alpha_s = 69...79^\circ$ ). Для среднего и нижнего РСПЭП углы ввода изменяются в более узком диапазоне:  $\alpha_s = 61...68^\circ$  и  $\alpha_s = 53...57^\circ$  соответственно. Значения коэффициента прозрачности  $\tilde{D}$  находятся в строгом соответствии с характером изменения  $\alpha_s$ . Можно сказать, что расфокусировка пучка лучей на цилиндрической поверхности валов умеренная. Однако при контроле верхней части шва соответствующими РСПЭП следует учитывать возможность появления помех, связанных с образованием поверхностных волн, поскольку углы ввода периферийных лучей  $\alpha_s$  могут превышать  $75^\circ$ .

Функция направленности поля излучения (приема) определялась по формуле [15]:

$$\Phi_i(X_i) = e^{-nX_i^2}, \quad (3)$$

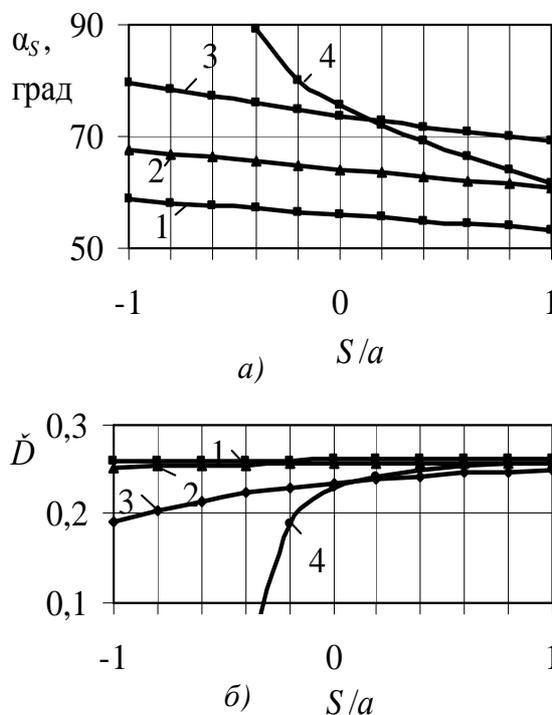
где  $X_i = a \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} k \sin \theta_i$ ;  $n=0,14$  – для источника, имеющего форму диска;  $k$  – волновое число.

Рассчитанные значения  $\Phi_i(X_i)$  при  $2a=6$ мм и  $\lambda=0,65$ мм для источника (приемника) показаны на рис.4, а. Видно, что при различном положении центральных лучей РСПЭП по высоте шва диаграмма направленности поля излучения (приема) несколько изменяется, что связано с различными значениями углов ввода  $\alpha$  для разных РСПЭП.

Функция затухания  $\psi$  является экспонентой с отрицательным показателем  $\delta r_i$  [16]. При контроле призматическими преобразователями часть пути ультразвука находится в призме преобразователя, коэффициент затухания в которой  $\delta_3$  отличается от коэффициента затухания в контролируемом материале  $\delta_m$ . Тогда

$$\psi_i = \exp(-\delta_m r'_i + \delta_3 r_3), \quad (4)$$

где  $r_3$  и  $r'_i$  – расстояния, проходимые ультразвуком в призме (от центра пьезопреобразователя до точки ввода) и в контролируемом материале соответственно.



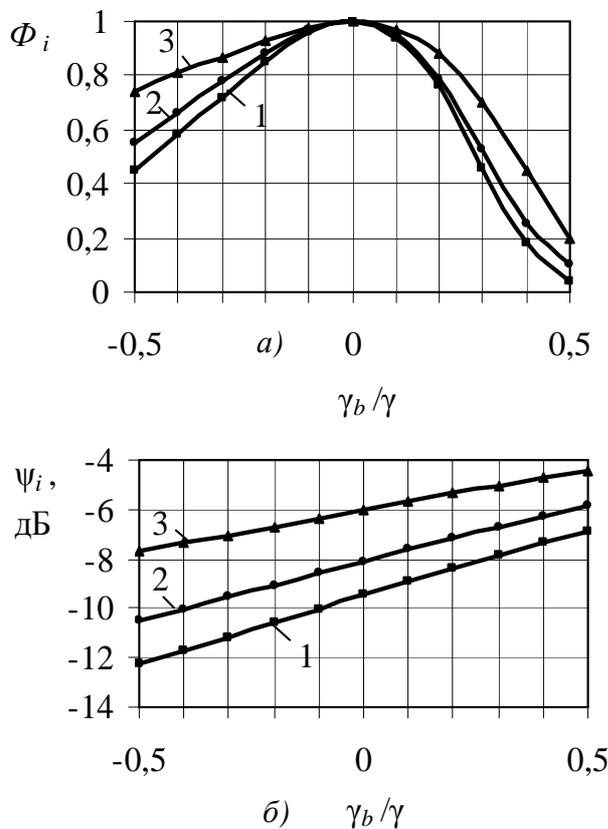
1 – для вала  $D=210$  мм (нижний РСПЭП); 2 –  $D=210$ мм (средний РСПЭП); 3 –  $D=210$ мм (верхний РСПЭП); 4 – для трубы  $D=42$ мм

**Рисунок 3 – Зависимость угла ввода периферийных лучей  $\alpha_s$  (а) и коэффициента прозрачности  $\tilde{D}$  (б) от параметра  $S/a$  для границы раздела плексиглас – сталь ЭП-609**

Расчетные значения  $\psi_i$  показаны на рис.4, б. Видно, что значение функции затухания для РСПЭП, прозвучивающих различные зоны сварного шва несколько отличается. Это связано с тем, что путь прохождения лучей в контролируемом материале для каждого из РСПЭП различен. Таким образом, для верхних РСПЭП функция затухания имеет наименьшее значение.

Рассчитанные АД-диаграммы для отражателей дискообразной формы, которые хорошо моделируют компактные плоскостные дефекты, показаны на рис.5. Здесь также приведены результаты эксперимента. Расчет и эксперимент проводились для вала  $D=132$  мм при условии расположения диска вертикально на оси шва при совпадении его центра с точкой

пересечения осей диаграмм направленности соответствующих РСПЭП.



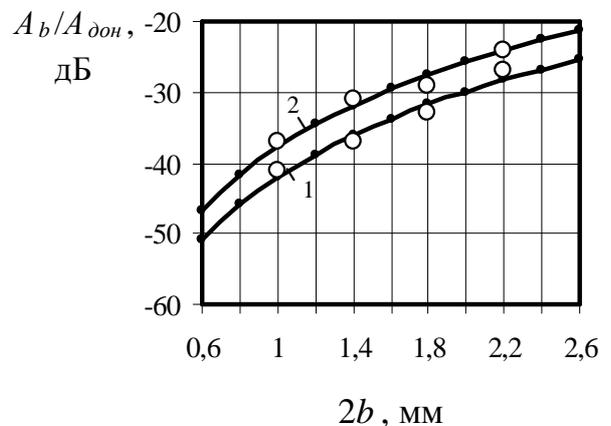
1 – нижний РСПЭП; 2 – средний РСПЭП; 3 – верхний РСПЭП

**Рисунок 4 – Зависимость функции направленности поля излучения (приема)  $\Phi_i$  (а) и функции затухания  $\Psi_i$  (б) от параметра  $\gamma_b/\gamma$  для вала  $D=210$  мм**

Для проведения эксперимента были изготовлены тест-образцы из сварного соединения вала с расположенными на разной глубине искусственными плоскодонными отражателями различного диаметра. Видно, что для разных РСПЭП амплитуда сигнала, отраженного от диска одинакового диаметра, несколько отличается. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает их удовлетворительную сходимость.

Выполненный выше анализ показал, что в случае прозвучивания шва вала несколькими РСПЭП, на значения коэффициентов ослабления сигнала существенное влияние оказывают геометрические особенности объекта контроля, а также различные акустические и геометрические параметры РСПЭП.

Значения углов ввода  $\alpha_s$  и соответствующие им значения коэффициента прозрачности  $\tilde{D}$  для центральных и периферийных лучей изменяются умеренно, что указывает на небольшую степень расфокусировки на границе раздела преобразователь–контролируемое изделие. Однако при контроле верхней части шва соответствующими РСПЭП следует учитывать возможность появления помех, связанных с образованием поверхностных волн, поскольку углы ввода периферийных лучей  $\alpha_s$  могут превышать  $75^\circ$ .



1 – расчет для нижнего РСПЭП ( $r=42,1$  мм); 2 – расчет для верхнего РСПЭП ( $r=25,6$  мм);  $\circ$  – эксперимент

**Рисунок 5 – АРД - диаграмма для дискового отражателя диаметром  $2b$  (вал  $D=132$  мм)**

Сравнение расчетных АРД-диаграмм и экспериментальных данных показало их удовлетворительную сходимость. Таким образом, полученные АРД-диаграммы для различных типоразмеров валов и соответствующих им РСПЭП позволяют оценивать размеры дефектов при ЭЛС.

### Література

1. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: Справоч. изд. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2-х книгах. Кн. 2 / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
3. Соколов С.Л., Яровой А.А. Оптимальные геометрические и акустические

параметры хордовых преобразователей для ультразвукового контроля сварных соединений газотурбинных валов // Методи та прилади контролю якості. – 2005, № 15. – С. 101–104.

4. А.с.491094 СССР. Способ ультразвукового контроля / Н.П. Алешин, И.Ю. Могильнер, А.З. Райхман и др. (СССР). – 1981933/25-28; Заявлено 28.12.73. Оpubл. 05.11.75. Бюл. № 41.

5. Яровой А.А. Хордовые преобразователи для ультразвукового контроля сварных швов труб малого диаметра // Матер. междунаrod. семинара «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». – Ялта, 2000. – С. 82–83.

6. Яровой А.А. Акустический тракт системы наклонных раздельно-совмещенных преобразователей и разработка аппаратуры автоматизированного ультразвукового контроля сварных стыков труб малого диаметра: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва: МВТУ, 1983. – 16 с.

7. Ушаков В.М. Особенности акустического тракта дефектоскопа при контроле сферических изделий наклонными преобразователями // Дефектоскопия. – 1985, № 6. – С. 15–21.

8. Расчет наклонных раздельно-совмещенных пьезопреобразователей с выравненной чувствительностью. / В.А. Медведев, Н.П. Алешин и др. // Дефектоскопия. – 1985, № 5. – С. 22–28.

9. Ермолов И.Н. Дифракция звука в акустическом тракте импульсного дефектоскопа // Акустический журнал. – 1960. – Т.6. – № 2. – С. 199–204.

10. Ермолов И.Н. Исследование акустического тракта наклонного искателя при ультразвуковой дефектоскопии // Заводская лаборатория. – 1968. – Т.34. – № 5. – С. 543–546.

11. Дианов Д.Б. К вопросу о переходе ультразвуковых волн через границу раздела двух твердых сред // Труды семинара ЛЭТИ. – Ленинград: ЛЭТИ, 1958. – С. 63–75.

12. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.

13. Ермолов И.Н., Басацкая Л.В. К вопросу экспериментального измерения диаграмм направленности преобразователей // Дефектоскопия. – 1989, № 4. – С. 3–7.

14. А.с.855487 СССР. Наклонный искатель для ультразвукового контроля труб / А.А. Яровой, Н.П. Алешин (СССР). – 2773603/25-28; Заявлено 29.05.79. Оpubл. 15.08.81. Бюл. № 30.

15. Щербинский В.Г., Белый В.Е. Эхо-зеркальный ультразвуковой метод обнаружения и распознавания дефектов сварных швов. – М.: Машиностроение, 1980. – 41 с.

16. Гурвич А.К. Ермолов И.Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. – К.: Техніка, 1972. – 460 с.