

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов специальности  
1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества  
и диагностики состояния объектов»  
очной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 620.179.17  
ББК 32.87  
П75

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «01» сентября 2023 г.,  
протокол № 1

Составители: канд. техн. наук, доц. С. С. Сергеев;  
ст. преподаватель Е. Н. Прокопенко

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Методические рекомендации к практическим занятиям по дисциплине  
«Приборы и методы акустического контроля» предназначены для студентов  
специальности 1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики  
состояния объектов» очной формы обучения.

Учебное издание

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 16 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2023

## Содержание

1 Расчет основных параметров акустических волн. Расчет коэффициентов отражения и прохождения .....	4
2 Расчет основных параметров акустических преобразователей. Расчет преобразователей на фазированных решетках .....	6
3 Анализ и расчет акустического тракта .....	6
4 Расчет чувствительности и производительности контроля.....	9
5 Разработка основных этапов методики контроля. Выбор и разработка метрологического обеспечения ультразвукового контроля.....	13
Список литературы.....	24
Приложение А.....	25
Приложение Б.....	26

# 1 Расчет основных параметров акустических волн. Расчет коэффициентов отражения и прохождения

## Задание

На плоскую границу раздела двух сред I и II с параметрами  $C_{л1}$ ,  $\rho_1$ ,  $E_2$ ,  $\mu_2$ ,  $\rho_2$  падает из среды I продольная волна под углом  $\beta$  с частотой колебаний  $f$ . Определить: скорости распространения продольной волны  $C_{л2}$  и поперечной волны  $C_{т2}$ ; характеристические импедансы сред  $Z_1$  и  $Z_2$ ; углы ввода для продольных  $\alpha_l$  и поперечных  $\alpha_t$  волн; критические углы  $\beta_{кр1}$ ,  $\beta_{кр2}$  для пары сред I и II; длины продольных  $\lambda_{л1}$ ,  $\lambda_{л2}$  и поперечных  $\lambda_{т1}$ ,  $\lambda_{т2}$  волн; коэффициенты прохождения для продольных и поперечных волн. В соответствии с полученными данными построить схему отражения и прохождения волн.

## Указания к выполнению задания

В твёрдой среде могут возникать как продольные, так и поперечные волны.

Скорость  $C_l$  продольных волн в среде с плотностью  $\rho$  определяется модулем нормальной упругости  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$ :

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}. \quad (1)$$

Для поперечной волны скорость  $C_t$  определяется модулем сдвига  $G$ :

$$C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (2)$$

а величина  $G$  связана с параметрами  $E$  и  $\mu$  соотношением

$$E = 2G(\mu + 1). \quad (3)$$

Важной акустической характеристикой материала является акустический импеданс, который вычисляется по формуле

$$Z = \rho C. \quad (4)$$

В общем случае на границе раздела двух твёрдых тел в результате падения плоской продольной волны под углом падения  $\beta$  возникают по две отражённых и преломлённых волны: продольных и поперечных (рисунок 1). Направления волн характеризуются углами отражения  $\beta_l$  и  $\beta_t$  и преломления  $\alpha_l$  и  $\alpha_t$ , которые определяются по закону синусов:

$$\frac{\sin \beta}{C_{l1}} = \frac{\sin \beta_t}{C_{l1}} = \frac{\sin \alpha_l}{C_{l2}} = \frac{\sin \alpha_t}{C_{l2}}. \quad (5)$$

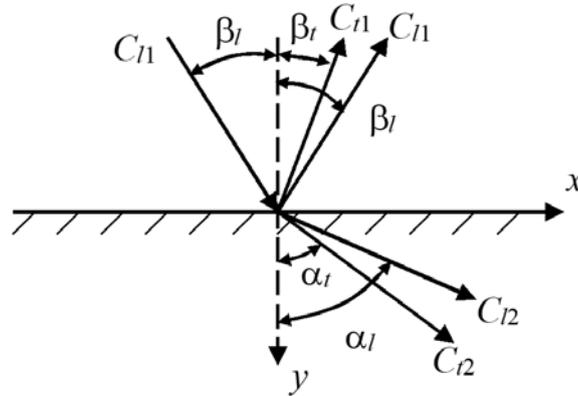


Рисунок 1 – Схема преломления и отражения на границе раздела сред

Если скорость падающей волны меньше, чем скорость какой-либо из преломленных или отражённых волн, то существуют критические значения углов падения. При условии  $C_{l1} < C_{l2}$  существует первый критический угол  $\beta_{кр1}$ , при котором преломлённая продольная волна превращается в неоднородную:

$$\beta_{кр1} = \arcsin \frac{C_{l1}}{C_{l2}}; \quad (6)$$

при условии  $C_{l1} < C_{l2}$  существует второй критический угол  $\beta_{кр2}$ , при котором преломлённая продольная волна превращается в неоднородную:

$$\beta_{кр2} = \arcsin \frac{C_{l1}}{C_{t2}}. \quad (7)$$

Для всех видов волн существует соотношение между частотой колебаний  $f$ , длиной волны  $\lambda$  и скоростью звука  $C$ :

$$f \cdot \lambda = C. \quad (8)$$

При наклонном падении продольной волны на границу раздела сред коэффициенты прохождения для продольных и поперечных волн рассчитываются по формулам

$$\tilde{D}_l = \frac{4Z_l Z_1 \cos^2 2\alpha_l}{(Z_l \cos^2 2\alpha_l + Z_l \sin^2 2\alpha_l + Z_1)^2}; \quad (9)$$

$$\tilde{D}_t = \frac{4Z_t Z_1 \cos^2 2\alpha_t}{(Z_t \cos^2 2\alpha_t + Z_t \sin^2 2\alpha_t + Z_1)^2},$$

где

$$Z_1 = \rho_1 C_{l1};$$

$$Z_l = \rho_2 C_{l2};$$

$$Z_t = \rho_2 C_{t2}.$$

Числовые данные для задания сведены в таблицу А.1.

## **2 Расчет основных параметров акустических преобразователей. Расчет преобразователей на фазированных решетках**

Методика расчета основных параметров акустических преобразователей приведена в [6, подразд. 3.3 и 3.4].

## **3 Анализ и расчет акустического тракта**

### **Задание**

Рассчитать акустический тракт эходефектоскопа в иммерсионном варианте при обнаружении в изделии расслоения с эквивалентной толщиной  $d$  и параметрами  $\rho_p, c_p$ . Изделие выполнено из заданного материала, его толщина –  $H$  и коэффициент затухания  $\delta_2$ . Толщина слоя иммерсионной жидкости –  $L$  с коэффициентом затухания  $\delta_1$ , рабочая частота  $f$ , радиус преобразователя –  $a$ . Определить амплитуду эхосигнала от передней грани изделия, рассчитать и построить изменение амплитуды эхосигнала в зависимости от глубины залегания расслоения  $h$ . Схема акустического тракта приведена на рисунке 2.

### **Указания к выполнению задания**

Амплитуда эхосигнала от передней грани изделия может быть определена зависимостью

$$\left| \frac{P_{nz}}{P_0} \right| = R_1 \left| \frac{P(L)}{P_0} \right| \exp(-2\delta_1 L), \quad (10)$$

где  $R_1$  – коэффициент отражения волн от передней грани изделия.

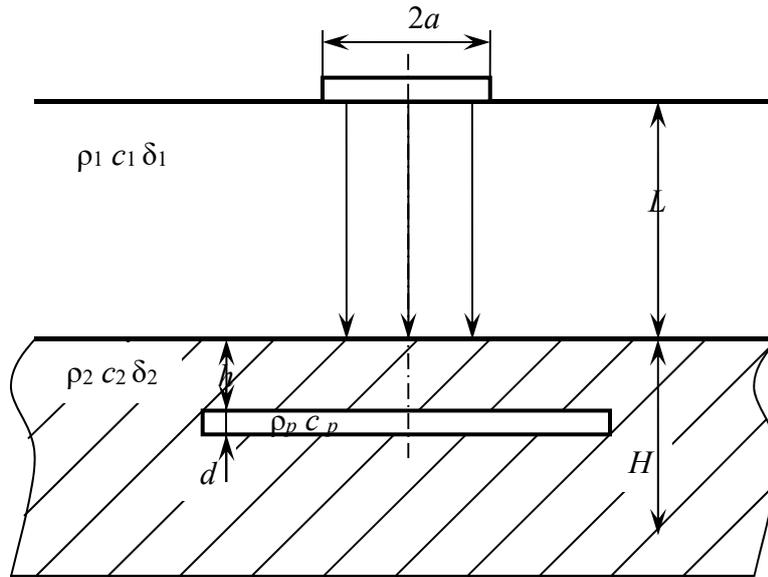


Рисунок 2 – Схема акустического тракта эходефектоскопа в иммерсионном варианте

$$R_1 = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}, \quad (11)$$

где

$$z_2 = \rho_2 c_2;$$

$$z_1 = \rho_1 c_1;$$

$\rho_1, c_1$  и  $\rho_2, c_2$  – плотность и скорость звука для продольных волн в жидкости и материале изделия соответственно.

Отношение  $\left| \frac{P(L)}{P_0} \right|$  при  $L > \frac{a^2 f}{c_1}$  определяется по формуле

$$\left| \frac{P(L)}{P_0} \right| = \frac{\pi a^2}{2L\lambda_1}, \quad (12)$$

где  $\lambda_1$  – длина волны в жидкости,  $\lambda_1 = c_1/f$ .

Для определения амплитуды эхосигнала от дефекта типа расслоение необходимо привести акустический тракт к однородной среде со свойствами одного из материалов (например, материал контролируемого изделия).

Тогда

$$r' = h + L \cdot n_1, \quad (13)$$

где  $n_1 = c_1/c_2$ .

Амплитуду эхосигнала от расслоения можно найти по формуле

$$\left| \frac{P_p}{P_0} \right| = \tilde{D} \cdot R_p \left| \frac{P(r')}{P_0} \right| \exp[-2(\delta_1 L + \delta_2 h)], \quad (14)$$

где  $\tilde{D}$  – коэффициент прозрачности границы раздела по энергии,

$$\tilde{D} = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2}; \quad (15)$$

$R_p$  – коэффициент отражения звука от расслоения,

$$R_p = \frac{\left( \frac{z_2 - z_p}{z_p - z_2} \right) \sin(K_p d)}{\sqrt{\left( \frac{z_2 - z_p}{z_p - z_2} \right)^2 \sin^2(K_p d) + 4 \cos^2(K_p d)}}, \quad (16)$$

где  $K_p$  – волновое число расслоения,

$$K_p = \frac{2\pi f}{c_p};$$

$$z_p = \rho_p c_p.$$

Отношение  $\left| \frac{P(r')}{P_0} \right|$  определяется по формуле

$$\left| \frac{P_p}{P_0} \right| = \tilde{D} \cdot R_p \left| \frac{P(r')}{P_0} \right| \exp[-2(\delta_1 L + \delta_2 h)], \quad (17)$$

где  $\lambda_2$  – длина волны в материале изделия,  $\lambda_2 = c_2/f$ .

Расчет изменения амплитуды эхосигнала в зависимости от глубины залегания расслоения производят, варьируя параметр  $h$  с шагом  $5 \cdot 10^{-3}$  м по всей толщине изделия. По полученным данным строят график  $\left| \frac{P_p}{P_0} \right| = f(h)$ .

Акустические параметры материала изделия необходимо взять из таблиц. Числовые данные для задания сведены в таблицу Б.1.

#### 4 Расчет чувствительности и производительности контроля

При контроле с использованием фазированных решеток наряду со всеми известными преимуществами технологии есть ряд негативных моментов, которые должны быть учтены при проведении контроля.

Одной из проблем при проведении контроля является вынужденная ограниченность количества применяемых фокальных законов, следствием этого является неравномерность чувствительности прибора по полю изображения. Для обеспечения равномерности чувствительности в пределах диапазона углов качания пучка при секторном сканировании требуется компенсация зависимости амплитуды эхосигнала от угла ввода. Величину компенсации можно определить по теоретическим АРУ (амплитуда – расстояние – угол) диаграммам, рассчитанным по формулам акустического тракта для каждого угла ввода. Формулы акустического тракта определяют ослабление амплитуды сигнала на этом пути.

Следует отметить, что независимо от типа отражателя на амплитуду эхосигналов от одинаковых экранов, расположенных в пределах прозвучиваемого поперечного сечения и озвучиваемых способом секторного сканирования, влияют несколько факторов, причем степень влияния каждого из них зависит от реализуемого угла ввода:

- эффективный размер активной апертуры преобразователя;
- расстояние от центра мнимого излучателя-приёмника, соответствующего активной апертуре, до точки выхода луча;
- затухание в призме (изменение длины хода луча по призме);
- коэффициент прозрачности по энергии на границе призма – объект;
- длина хода луча по контролируемому материалу.

Реальные дефекты могут иметь самую разнообразную форму, ориентацию и акустические свойства, которые заранее неизвестны, поэтому формулы акустического тракта выводятся обычно для моделей дефектов в виде полых отражателей простой формы. В качестве модели трещины рассмотрим диск, непровара в корне шва – бесконечную полосу, газовой поры – сферу.

Расчетная схема акустического тракта с дисковым отражателем представлена на рисунке 3.

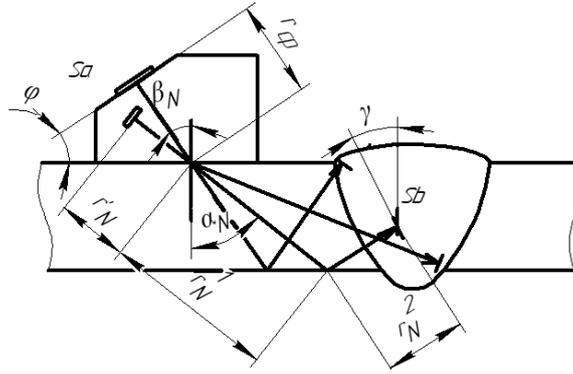


Рисунок 3 – Схема для расчета акустического тракта с дисковым отражателем

Уравнение акустического тракта для дискового отражателя площадью  $S_b$  для каждого угла ввода имеет следующий вид:

$$\left| \frac{P}{P_0}(r_N, \alpha_N) \right| = \frac{S_b \cdot S_a \cdot \cos \alpha_N}{\lambda^2 (r_N + r'_N(\beta_N))^2} \cdot D_{lt}(\beta_N) \cdot e^{[-2(\delta \cdot r_N + \delta_1 r_1(\beta_N))]}, \quad (18)$$

где  $\lambda$  – длина волны в объекте контроля;

$r_N$  – путь ультразвука в объекте;

$r_1(\beta_N)$  – средний путь ультразвукового пучка в призме преобразователя;

$r'_1(\beta_N)$  – путь ультразвука от мнимой пьезопластины до точки ввода в объект;

$D_{lt}(\beta_N)$  – коэффициент прохождения через границу призма – объект;

$\delta, \delta_1$  – затухание ультразвука в объекте и призме;

$\beta_N$  – угол падения пучка в призме;

$S_a$  – площадь фазированной решётки;

$S_b$  – площадь дискового отражателя;

$\alpha_N$  – угол ввода в объект контроля.

Угол ввода в объект контроля

$$\alpha_N(\beta_N) = \arcsin\left(\frac{C_{ln} \cdot \sin \beta_N}{C_t}\right),$$

где  $C_{ln}$  – скорость продольной волны в призме;

$C_t$  – скорость поперечной волны в объекте контроля.

Средний путь ультразвукового пучка в призме определяется зависимостью

$$r_1(\beta_N) = \frac{r_0 \cdot \cos \varphi}{\cos \beta_N},$$

где  $r_0$  – средний путь ультразвукового пучка в призме при  $\beta_N = \varphi$ .

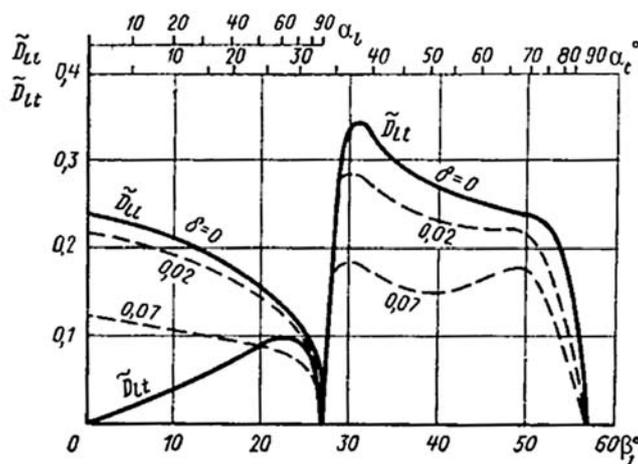
Путь ультразвука от мнимой пьезопластины до точки ввода в объект в зависимости от угла ввода находится по формуле

$$r'_N(\beta_N) = \frac{r_1(\beta_N) \cdot C_{in} \cdot \cos \alpha_N}{C_t \cdot \cos \beta_N}. \quad (19)$$

Коэффициент прохождения через границу призма – объект с учетом изменения угла ввода выбирается исходя из графика, представленного на рисунке 4.

Если происходит однократное отражение ультразвукового пучка, то длина пути до дефекта в объекте определяется по формуле

$$r_N = r_N^1 + r_N^2. \quad (20)$$



$\delta$  – толщина контактного слоя масла

Рисунок 4 – График изменения коэффициента прохождения при падении продольной волны из оргстекла на границу со сталью

Так как дефект может быть ориентирован под любым углом, то

$$S_b = \pi \cdot b^2 \cdot \cos \gamma, \quad (21)$$

где  $b$  – радиус дефекта;

$\gamma$  – угол наклона дефекта.

Расчетная схема акустического тракта с отражателем в виде бесконечной полосы представлена на рисунке 5.



для поперечных волн, трансформированных из продольной волны, для различных искусственных ненаправленных отражателей при различных углах ввода. При этом будет учтено влияние изменения: эффективного размера активной апертуры преобразователя; расстояния от центра мнимого излучателя-приёмника, соответствующего активной апертуре, до точки выхода луча; затухания в призме (изменение длины хода луча по призме); коэффициента прозрачности по энергии на границе призма – объект; длины хода луча по контролируемому материалу.

Производительность контроля рассмотрена в [6, подразд. 4.2].

## **5 Разработка основных этапов методики контроля. Выбор и разработка метрологического обеспечения ультразвукового контроля**

### **5.1 Общие положения**

Ультразвуковой контроль проводят с целью выявления трещин, непроваров, пор и шлаковых включений в сварных швах листовых и трубчатых элементов металлических конструкций из ферритных сталей толщиной 6...40 мм, в том числе для выявления трещин и расслоений в околошовных зонах и основном металле.

Ультразвуковыми методами могут быть проконтролированы:

- стыковые сварные соединения, выполненные с остающейся подкладкой (кольцом) или без нее;
- угловые и тавровые сварные соединения, выполненные с полным проплавлением свариваемых кромок;
- нахлесточные сварные соединения.

Инструкции предусматривают проведение ультразвукового контроля при обеспечении достаточной зоны контроля на поверхности контролируемого объекта, которая позволяет осуществить перемещение преобразователей.

Инструкции предусматривают проведение ультразвукового контроля эхометодом наклонными пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП). Контроль проводят контактным способом, перемещая ПЭП по поверхности металлической конструкции.

При ультразвуковом контроле не гарантируется выявление дефектов в пределах «мертвой зоны» преобразователя, а также дефектов в зоне индикации мешающих сигналов, возникающих из-за неровности усиления сварного шва, конструктивных особенностей стыковых сварных соединений (смещение кромок стыкуемых труб из-за разности толщины их стенок).

Необходимость ультразвукового контроля, его объем и недопустимые дефекты при изготовлении, строительстве, ремонте, реконструкции, эксплуатации и техническом диагностировании (освидетельствовании) технических устройств и сооружений определяются соответствующей документацией на их изготовление, строительство, ремонт, реконструкцию, эксплуатацию и техническое диагностирование (освидетельствование).

Ультразвуковой контроль выполняют в соответствии с технологическими инструкциями (картами), разработанными на основе настоящих методических рекомендаций, и полностью учитывающими их требования. В технологической инструкции (карте) должны быть приведены:

- порядок выполнения операций проверки работоспособности и настройки аппаратуры;
- разметка изделия под контроль, схема и направление прозвучивания, ширина зоны зачистки;
- параметры контроля;
- порядок проведения контроля;
- оценка качества объекта с указанием особенностей эксплуатации применяемой аппаратуры, конкретных параметров контроля, а также информативных признаков выявляемых дефектов и возможных помех.

## ***5.2 Организация контроля***

Лаборатории, выполняющие ультразвуковой контроль, аттестуются в соответствии с Правилами аттестации и основными требованиями к лабораториям неразрушающего контроля.

Места проведения контроля должны быть оснащены средствами защиты от ярких источников света (постов электросварки, резки и т. п.). При контроле на открытом месте в дневное время или при сильном искусственном освещении необходимо принять меры к затемнению экрана дефектоскопа.

Колебания напряжения в электрической сети, к которой подключают дефектоскопы, не должны превышать значений, указанных в техническом описании дефектоскопа.

В необходимых случаях для обеспечения безопасного и удобного взаимного расположения дефектоскописта, аппаратуры и контролируемого участка следует устанавливать леса, подмости, лестницы или использовать подъемники.

Для работы в труднодоступных местах и на высоте в помощь дефектоскописту должен быть выделен вспомогательный персонал.

Подготовка сварного соединения под контроль и удаление контактной смазки после окончания контроля в обязанности дефектоскописта не входит и выполняется специально выделенным персоналом.

Контроль должен проводиться при температурах окружающего воздуха и поверхности изделия в месте проведения контроля от плюс 5 °С до плюс 40 °С.

## ***5.3 Квалификация персонала***

Специалисты, осуществляющие ультразвуковой контроль, аттестуются в соответствии с Правилами аттестации персонала в области неразрушающего контроля.

Руководитель работ по ультразвуковому контролю должен иметь квалификацию не ниже II уровня.

Заключения о результатах контроля подписывают специалисты неразрушающего контроля, имеющие квалификацию не ниже II уровня.

#### **5.4 Средства контроля**

Для проведения ультразвукового контроля необходимо использовать:

- импульсные ультразвуковые дефектоскопы с комплектами преобразователей и соединительных кабелей;
- стандартные образцы СО-2 и СО-3;
- контрольные образцы предприятия (КОПы).

Стандартные образцы предназначены для проверки работоспособности ультразвуковых дефектоскопов и преобразователей.

КОПы изготавливаются из материала объекта контроля и представляют собой изделия с отражателями типа цилиндрических отверстий, пазов, рисок, плоских угловых отражателей «зарубка» и др.

#### **5.5 Подготовка к контролю**

**5.5.1 Последовательность операций.** Подготовка к проведению контроля состоит в выполнении следующих операций:

- изучение конструкции контролируемого элемента, требований чертежей, технологической инструкции (карты) на контроль объекта и другой документации;
- анализ результатов предыдущего контроля (если он проводился) и принятие решения о необходимости и возможности ультразвукового контроля;
- выбор основных параметров и средств контроля;
- подготовка поверхности, по которой будет перемещаться преобразователь;
- разметка сварного соединения под контроль;
- нанесение контактной смазки;
- проверка работоспособности ультразвукового дефектоскопа;
- настройка длительности развертки, зоны контроля, чувствительности, ВРЧ.

**5.5.2 Изучение конструкции сварного соединения.** При изучении конструкции сварного соединения следует определить его тип (стыковое, тавровое, нахлесточное, угловое), характер выполнения соединения (с полным проплавлением, с конструкторским непроваром, с подкладной пластиной или кольцом, без подкладных пластин или колец), форму элементов, образующих сварное соединение, материал (марку стали), из которого изготовлено сварное соединение, доступ к сварному соединению (выбрать поверхности, по которым будет осуществляться сканирование).

**5.5.3 Выбор основных параметров и средств контроля.** Выбор угла ввода луча ПЭП должен удовлетворять следующему условию: при контроле прямым лучом должно обеспечиваться прозвучивание как минимум нижней половины сварного соединения – при двусторонней сварке и как минимум нижней 1/4 части шва – при односторонней. При контроле прямым и отраженным лучом должно обеспечиваться прозвучивание всего сечения сварного соединения. Если в нормативно-технической документации не указан тип ПЭП, следует руководствоваться таблицей 1.

Настройку чувствительности проводят с целью обеспечения надежного выявления минимально фиксируемого дефекта во всем диапазоне глубин. Если в НТД не указаны максимально допустимые значения характеристик несплошности, следует руководствоваться таблицей 2.

Таблица 1 – Рекомендуемые параметры ПЭП

Номинальная толщина свариваемых элементов	Частота, МГц	Угол ввода, град, при контроле лучом	
		прямым	отраженным
От 2 до 8 включ.	4,0...10	70...75	70...75
Св. 8 до 12 включ.	2,5...5,0	65...70	65...70
Св. 12 до 20 включ.	2,5...5,0	65...70	65...70
Св. 20 до 40 включ.	1,8...4,0	60...65	45...65
Св. 40 до 70 включ.	1,25...2,5	50...65	40...50
Св. 70 до 125 включ.	1,25...2,0	45...65	Контроль не производится

Таблица 2 – Максимально допустимые значения характеристик несплошностей

Номинальная толщина свариваемых элементов, мм	Эквивалентная площадь одиночных несплошностей, мм <sup>2</sup>	Число фиксируемых одиночных несплошностей на любые 100 мм длины сварного соединения	Протяженность несплошностей	
			20 % внутреннего периметра сварного соединения	Условная протяженность компактной (точечной) несплошности
От 2 до 3	0,6	6	20 % внутреннего периметра сварного соединения	Условная протяженность компактной (точечной) несплошности
От 3 до 4	0,9	6		
От 4 до 5	1,2	7		
От 5 до 6	1,2	7		
От 6 до 9	1,8	7		
От 9 до 10	2,5	7		
От 10 до 12	2,5	8		
От 12 до 18	3,5	8		
От 18 до 26	5,0	8		
От 26 до 40	7,0	9		
От 40 до 60	10,0	10		
От 60 до 80	15,0	11		
От 80 до 120	20,0	11		

Для определения размера плоского контрольного отражателя типа «зарубка» необходимо воспользоваться графиком, приведенным в ГОСТ 14786–82 или других документах.

Площадь зарубки определяется по формуле

$$S_{зар} = S_{экв} / N,$$

где  $S_{экв}$  – площадь плоскодонного отражателя;

$S_{зар}$  – площадь зарубки;

$N$  – коэффициент, определяемый из графика.

**5.5.4 Выбор схемы прозвучивания.** Стыковые сварные соединения в зависимости от доступности контролируют наклонными ПЭП:

- прямым и однократно отраженным лучом с четырех сторон (рисунок 7, а);
- прямым и однократно отраженным лучом с двух сторон при недоступности для контроля одной поверхности (рисунок 7, б);
- прямым и однократно отраженным лучом с одной стороны, если остальные стороны недоступны для контроля (рисунок 7, в).

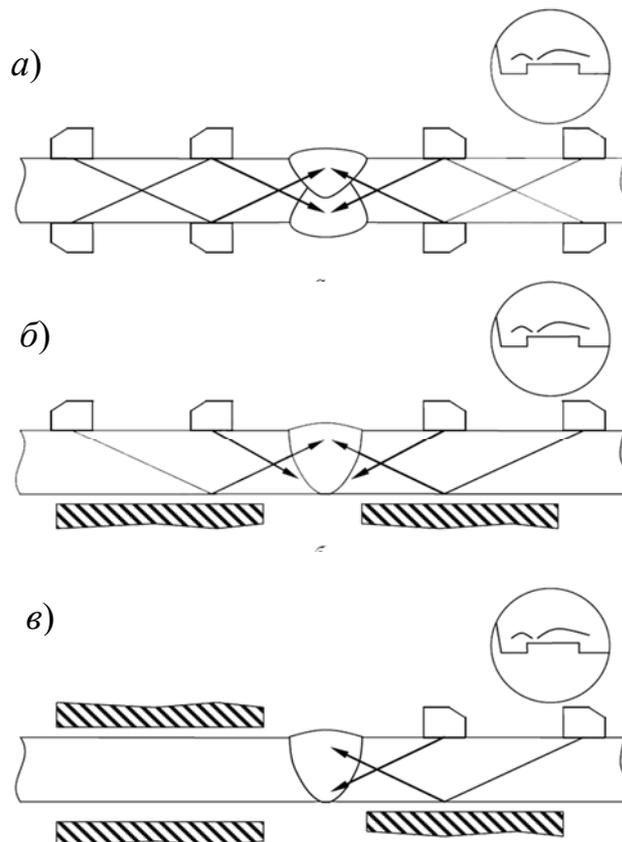


Рисунок 7 – Схемы контроля стыковых сварных соединений

Контроль стыковых сварных соединений с разной толщиной свариваемых элементов проводят со стороны листа меньшей толщины (рисунок 8).

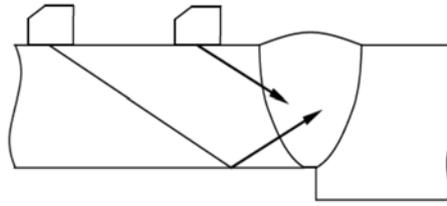


Рисунок 8 – Схема контроля сварных соединений с разной толщиной свариваемых элементов

При контроле стыковых сварных соединений элементов, имеющих скосы от кромок, прозвучивание со стороны скоса не производят (рисунок 9).

В зависимости от доступности угловые и тавровые соединения контролируют по одной из следующих схем:

- прямым и однократно отраженным лучом наклонным совмещенным ПЭП со стороны привариваемого элемента, а так же прямым РС ПЭП со стороны основного элемента при двусторонней сварке и толщине основного элемента 10 мм и более (рисунок 10, а);

- прямым и однократно отраженным лучом наклонным совмещенным ПЭП с обеих сторон привариваемого элемента при отсутствии доступа со стороны основного элемента или при толщине основного элемента менее 10 мм (рисунок 10, б);

- прямым и однократно отраженным лучом наклонным совмещенным ПЭП с одной стороны привариваемого элемента при отсутствии доступа со стороны основного элемента и другой стороны привариваемого элемента (рисунок 10, в);

- прямым лучом наклонным совмещенным ПЭП и прямым раздельно-совмещенным ПЭП со стороны основного элемента при отсутствии доступа со стороны привариваемого элемента и при двусторонней сварке и толщине основного элемента не менее 10 мм (рисунок 10, г).

Угловые соединения, у которых оба соединенных элемента сварены торцовыми поверхностями, контролируют по схеме, представленной на рисунке 10, д.

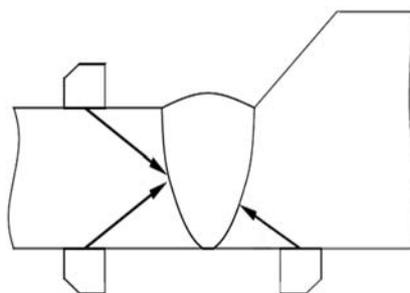


Рисунок 9 – Схема контроля сварных соединений элементов, имеющих скосы кромок

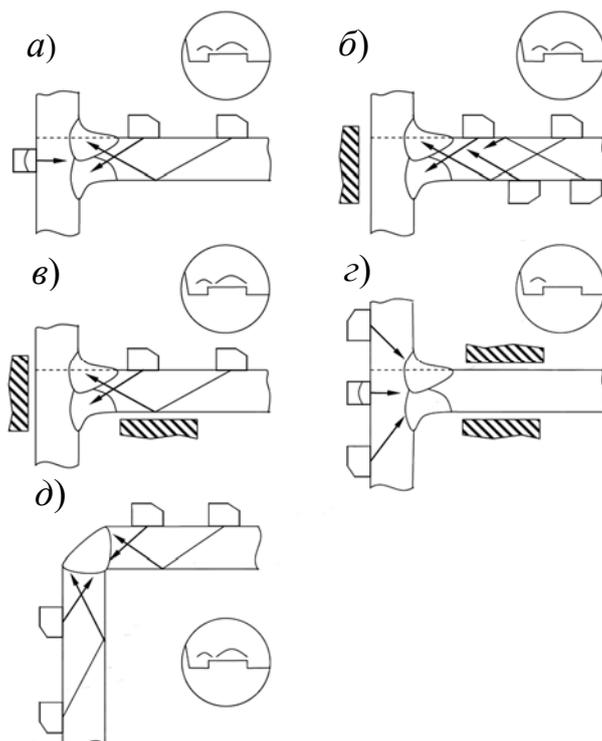


Рисунок 10 – Схемы контроля тавровых и угловых сварных соединений

Контроль нахлесточных сварных соединений осуществляют наклонными совмещенными ПЭП со стороны нижнего и верхнего листа (рисунок 11).

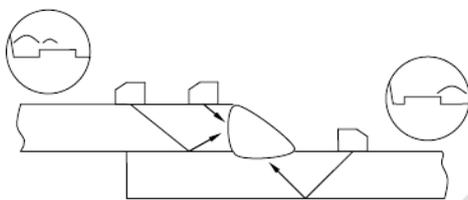


Рисунок 11 – Схема контроля нахлесточных сварных соединений

**5.5.5 Подготовка поверхности.** Зоны перемещения ПЭП должны быть очищены (зачищены) от брызг металла, крупных неровностей, отслаивающейся окалины и краски, грязи по всей длине контролируемого участка.

При подготовке зоны перемещения ПЭП с помощью механической обработки шероховатость поверхности не должна быть грубее  $Rz\ 40\ \mu\text{м}$  ( $Ra\ 6,3\ \mu\text{м}$ ) по ГОСТ 2789. Волнистость контролируемой поверхности не должна создавать зазор более  $0,5\ \text{мм}$  ( $0,015$ ) между ПЭП и контролируемой поверхностью.

Для цилиндрических и сферических преобразователей контактная поверхность преобразователя должны быть «притерта» к поверхности в том случае, если не выполняется следующее требование:

$$D > 15 \cdot a,$$

где  $D$  – диаметр объекта, мм;

$a$  – размер основания контактной поверхности ПЭП в направлении контроля к поверхности, мм.

Зона перемещения преобразователя при ультразвуковом контроле сварных соединений выбирается из условия прозвучивания его прямым и однократно отраженным ультразвуковым лучом с обеих сторон сварного шва и зоны контроля.

Зона перемещения рассчитывается по формуле

$$X = 2H \operatorname{tg} \alpha + B - n,$$

где  $X$  – зона перемещения ПЭП;

$H$  – номинальная толщина сварных элементов;

$\alpha$  – угол ввода;

$B$  – ширина околошовной зоны (ОШЗ);

$n$  – стрела ПЭП.

Зона контроля включает в себя сварной шов и ОШЗ. Рекомендуемые параметры, если не оговорено иное: ОШЗ в сварных соединениях до 20 мм равна номинальной толщине (но не менее 10 мм), в сварных соединениях более 20 мм – 20 мм.

Ширина подготовленной под контроль зоны должна быть не менее (рисунок 12):

$$L > 2 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \alpha + A + B,$$

где  $L$  – зона зачистки;

$A$  – длина контактной поверхности ПЭП.

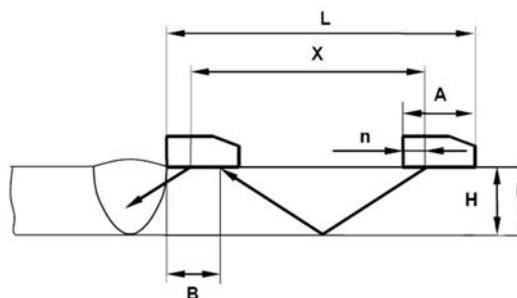


Рисунок 12 – Зона зачистки и зона перемещения

**5.5.6 Проверка работоспособности средств контроля.** Проверку работоспособности дефектоскопа и ПЭП перед проведением контроля объектов осуществляют с помощью стандартных образцов.

Проверку мертвой зоны (рисунок 13) наклонного ПЭП осуществляют по боковому отверстию диаметром 2 мм, расположенному на расстоянии 3 мм от поверхности в СО-2. Мертвой зоной считают минимальное расстояние

от поверхности ввода до бокового отверстия, если эхосигнал от него разделяется с зондирующим импульсом на уровне не менее 6 дБ.

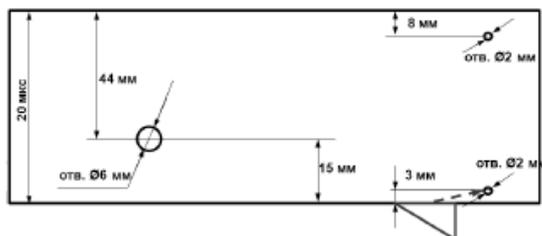


Рисунок 13 – Проверка мертвой зоны наклонного ПЭП по стандартному образцу СО-2

По СО-3 (рисунок 14) проверяют положение точки выхода ПЭП, измеряют стрелу, определяют время распространения УЗ-колебаний в призме наклонного ПЭП (время задержки). Устанавливают ПЭП в положение, соответствующее максимальной амплитуде эхосигнала от вогнутой цилиндрической поверхности в СО-3. Радиус образца – 55 мм, скорость распространения поперечной волны – 3260 м/с, время распространения УЗ-колебаний в СО-3 равно 33,7 мкс.

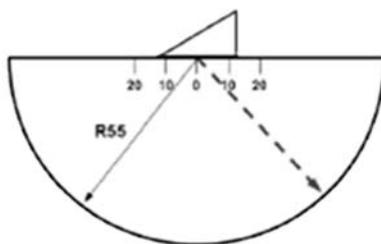


Рисунок 14 – Определение положения точки выхода, измерение стрелы, определение времени задержки в наклонном ПЭП по стандартному образцу СО-3

Определяют время задержки  $t_{зад}$  либо меняя параметр «задержка» в настройках прибора до тех пор, пока прибор не будет показывать расстояние по лучу, равное 55 мм, либо вычисляя по формуле

$$t_{зад} = t - 33,7,$$

где  $t_{зад}$  – время распространения УЗ-колебаний в призме наклонного ПЭП;

$t$  – суммарное время между зондирующим импульсом и эхосигналом от вогнутой поверхности СО-3.

По СО-2 определяют угол ввода. Углы ввода, значения которых меньше или равны  $65^\circ$ , следует измерять по боковому отверстию диаметром 6 мм на глубине 44 мм (рисунок 15); углы ввода, большие или равные  $70^\circ$ , следует измерять по тому же отверстию диаметром 6 мм, но с плоскости, отстоящей от центра отверстия на расстоянии 15 мм.

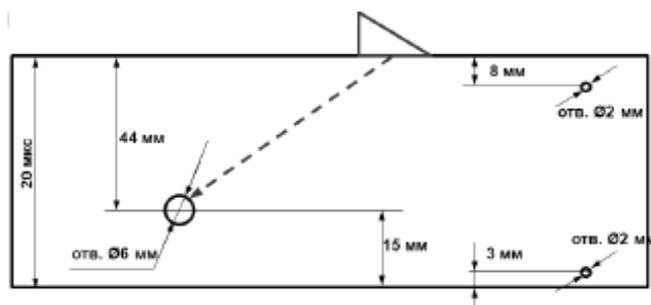


Рисунок 15 – Проверка угла ввода наклонного ПЭП по стандартному образцу СО-2

5.5.7 *Настройка длительности развертки, чувствительности, временной регулировки чувствительности ВРЧ.* Длительность развертки должна быть равна не менее двойной толщины сварного соединения при контроле прямым и однократно отраженным лучом. Если настройки прибора позволяют устанавливать зону контроля только по лучу, то по формуле следует вычислить

$$S = 2H / \cos \alpha,$$

где  $S$  – расстояние по лучу до максимально удаленного отражателя;

$H$  – толщина сварного соединения;

$\alpha$  – угол ввода.

ВРЧ устанавливается, если не оговорено иное в НТД, по зарубкам (рисунок 16). В соответствии с руководством по эксплуатации дефектоскопа следует установить на один уровень (браковочный, 80 % от высоты экрана) амплитуду эхосигнала от зарубки, полученную на прямом луче, и амплитуду эхосигнала от зарубки, полученную однократно отраженным лучом (рисунок 17). Контрольный уровень (40 % от высоты экрана) отличается от браковочного на 6 дБ (в 2 раза).

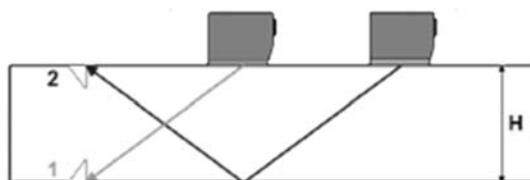


Рисунок 16 – Настройка ВРЧ по зарубкам

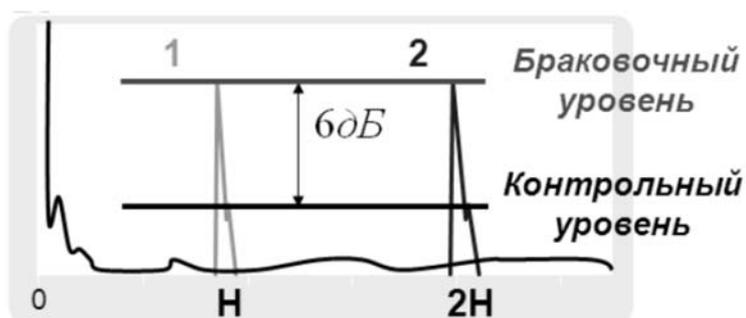


Рисунок 17 – Вид экрана после настройки ВРЧ

## 5.6 Проведение контроля

**5.6.1 Последовательность контроля.** При ультразвуковом контроле выполняют следующие технологические операции: сканирование; измерение характеристик несплошностей; оценка и оформление результатов контроля.

**5.6.2 Сканирование.** Сканирование выполняют по всей длине шва путем последовательного перемещения ПЭП по поверхности сваренных элементов (рисунок 18). Величина продольного шага сканирования не должна превышать половины диаметра пьезоэлемента ПЭП.

При сканировании на плоских поверхностях ПЭП необходимо придавать непрерывное вращательное движение на угол  $\pm 15^\circ$ .

При обнаружении несплошности, эхосигнал от которой превышает контрольный уровень (фиксации), необходимо зафиксировать: амплитуду эхосигнала от несплошности (значение в децибеллах, измеренное относительно браковочного уровня); координаты несплошности; условную протяженность (длину индикации).

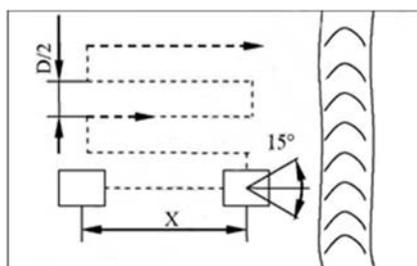


Рисунок 18 – Схема сканирования

**5.6.3 Оценка результатов контроля.** Классификация найденных несплошностей производится в соответствии с таблицей 2.

## Список литературы

- 1 Методы контроля качества в машиностроении : учебное пособие / Е. Г. Кравченко [и др.]. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 132 с.
- 2 **Овчинников, В. В.** Контроль качества сварных соединений. Практикум: учебное пособие / В. В. Овчинников. – 4-е изд., стер. – Москва: Академия, 2018. – 96 с.
- 3 Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль / Под общ. ред. В. В. Клюева. – Москва: Машиностроение, 2004. – 864 с.: ил.
- 4 **Алешин, Н. П.** Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие / Н. П. Алешин. – Москва: Машиностроение, 2006. – 368 с.
- 5 Ультразвуковой контроль: учебное пособие / Под общ. ред. В. В. Клюева. – Москва: Спектр, 2011. – 224 с.
- 6 Приборы и системы акустического контроля: методические рекомендации к курсовому проектированию для студентов направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение» / Сост. С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – 48 с.
- 7 **Зацепин, А. Ф.** Акустические измерения: учебное пособие / А. Ф. Зацепин; под ред. В. Е. Щербина. – Москва: Юрайт; Екатеринбург: Урал. ун-т, 2022. – 209 с.
- 8 **Овчинников, В. В.** Контроль качества сварных швов и соединений: учебник / В. В. Овчинников. – Москва; Вологда: Инфро-инженерия, 2022. – 208 с.

## Приложение А (обязательное)

Таблица А.1 – Исходные данные к заданию раздела 1

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_{II}$ , м/с	2600	2850	2220	2400	2175	1950	2650	2800	2250	2100
$E_2$ , $10^{10}$ Па	20,4	15,0	17,5	16,3	18,4	22,5	19,5	19,8	19,0	16,0
$\mu_2$	0,23	0,28	0,29	0,28	0,28	0,3	0,29	0,33	0,26	0,28
$\rho_1$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	1,06	1,18	1,2	1,4	1,35	1,2	1	1,6	1,5	1,3
$\rho_2$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	7,8	8,2	7,0	7,5	8,4	8,8	8,2	6,2	6,0	5,8
$\beta$ , град	10	12	15	18	23	20	16	15	30	25
$f$ , МГц	1,5	2,5	2,0	1,5	2,5	1,8	2,5	3,0	5,0	5,0

Продолжение таблицы А.1

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$C_{II}$ , м/с	2050	2300	2100	2050	1900	2350	1900	2150	2670	2720
$E_2$ , $10^{10}$ Па	12,5	10,1	12,5	7,1	11,7	5,5	19,8	19,0	16,0	18,5
$\mu_2$	0,35	0,35	0,31	0,34	0,27	0,39	0,38	0,26	0,29	0,28
$\rho_1$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	1,4	1,18	1,3	1,45	1,4	1,15	1,27	1,6	1,35	1,22
$\rho_2$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	8,9	8,1	8,2	5,7	7,7	7,3	4,5	7,81	8,03	8,4
$\beta$ , град	20	12	20	30	25	23	16	16	15	10
$f$ , МГц	1,8	2,5	2,0	1,5	1,0	2,5	3,5	5,0	3,0	2,5

Продолжение таблицы А.1

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$C_{II}$ , м/с	2540	2300	2300	2450	2200	2100	2050	1980	2620	2700
$E_2$ , $10^{10}$ Па	15,0	23,5	10,1	9,5	4,1	5,5	28	18,0	12,5	19,4
$\mu_2$	0,29	0,28	0,31	0,33	0,33	0,39	0,28	0,29	0,35	0,27
$\rho_1$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	1,2	1,4	1,2	1,15	1,2	1,46	1,52	1,18	1,25	1,6
$\rho_2$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	8,0	10,4	7,8	8,4	7,6	8,2	6,5	9,5	10,2	6,2
$\beta$ , град	13	11	18	20	15	18	20	10	9	12
$f$ , МГц	2,0	1,8	1,5	1,0	2,5	1,8	3,0	3,5	5,0	3,0

## Приложение Б (обязательное)

Таблица Б.1 – Исходные данные к заданию раздела 3

Вариант	$a, \cdot 10^3 \text{ м}$	$f, \text{ МГц}$	$L, \cdot 10^3 \text{ м}$	$h, \cdot 10^3 \text{ м}$	$d, \cdot 10^3 \text{ м}$	$\rho_p, 10^{-3} \text{ кг/м}^3$	$c_p, \text{ м/с}$	$\delta_1, \text{ м}^{-1}$	$\delta_2, \text{ м}^{-1}$	Иммерсионная жидкость	Материал изделия
1	7,0	3,0	125	65	0,5	1,4	1200	0,04	0,5	Вода	Сталь
2	10,5	1,0	150	60	1,5	1,2	1250	0,01	0,1	Глицерин	Алюминий
3	8,0	2,5	180	45	0,8	1,7	1780	0,03	2,5	Вода	Титан
4	11,0	1,0	200	55	1,0	2,2	1640	0,02	4,0	Вода	Медь
5	9,5	1,5	220	50	1,2	2,4	1550	0,03	0,3	Глицерин	Сталь
6	6,0	4,0	120	40	1,4	1,5	1400	0,05	0,15	Глицерин	Алюминий
7	6,5	4,0	140	50	2,0	2,8	1350	0,04	3,0	Вода	Титан
8	7,0	4,0	145	45	0,4	1,1	1800	0,04	0,8	Вода	Сталь
9	9,0	2,0	230	48	0,2	2,2	1650	0,04	3,2	Глицерин	Медь
10	5,0	5,0	120	40	0,8	2,1	1420	0,05	0,2	Вода	Алюминий
11	4,5	5,0	135	32	1,2	1,7	1340	0,06	1,0	Глицерин	Сталь
12	8,5	2,0	200	50	1,4	2,0	1250	0,02	3,5	Вода	Титан
13	5,0	1,5	155	40	1,0	1,6	1650	0,05	1,5	Вода	Сталь
14	6,0	4,0	160	60	1,5	1,3	1600	0,03	4,5	Вода	Медь
15	5,0	5,0	180	38	1,0	2,2	1500	0,05	3,2	Глицерин	Никель
16	6,5	3,0	175	65	0,9	1,4	1480	0,04	5,0	Вода	Латунь
17	8,5	2,5	190	48	0,8	1,6	1300	0,03	0,5	Глицерин	Сталь
18	8,0	2,0	225	52	0,5	1,8	1560	0,03	0,12	Вода	Алюминий
19	8,0	2,5	200	48	0,4	2,3	1780	0,03	3,0	Вода	Никель
20	5,5	3,0	140	70	0,5	1,9	1240	0,06	3,0	Глицерин	Титан
21	9,0	2,0	180	55	0,8	1,2	1600	0,02	0,4	Глицерин	Сталь
22	9,0	1,5	210	60	1,1	1,3	1500	0,03	0,1	Вода	Алюминий
23	6,0	5,0	130	30	1,3	1,7	1750	0,08	8,0	Вода	Медь
24	4,5	5,0	145	35	0,8	2,1	1240	0,06	3,5	Глицерин	Титан
25	10,0	1,0	250	50	0,7	2,0	1800	0,02	0,6	Вода	Сталь