

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

---

# СРЕДСТВА ИНТРОСКОПИИ

методические указания  
к выполнению контрольных заданий



Составитель – Ю. В. Бакшеева

Рецензент – кандидат технических наук, доцент *М. А. Волохов*

Содержат программу дисциплины «Средства интроскопии» и контрольные задания. Предназначено для студентов заочной формы обучения по направлению 11.03.01 «Радиотехника». Также будут полезны студентам дневной формы обучения по направлению 11.03.01 «Радиотехника» и студентам направления 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии».

Публикуется в авторской редакции.  
Компьютерная верстка *С. Б. Мацапуры*

---

Сдано в набор 17.12.18. Подписано к печати 19.12.18.

Формат 60·84 1/16. Усл. печ. л. 1,4.

Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 50 экз. Заказ № 641.

---

Редакционно-издательский центр ГУАП  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67

© Санкт-Петербургский государственный  
университет аэрокосмического  
приборостроения, 2018

## ВВЕДЕНИЕ

Цель дисциплины «Средства интроскопии» – формирование у студентов знаний и навыков в одной из важных областей современной прикладной радиоэлектроники – интроскопии, в частности, ультразвуковой интроскопии, включающей в себя ультразвуковую диагностическую технику, широко применяемую в современной медицине, а также ультразвуковую технику для осуществления неразрушающего контроля материалов и промышленных изделий.

Принцип действия современных средств интроскопии, а также алгоритмы обработки сигналов, положенные в основу их работы, близки, а подчас и аналогичны идеям и методам радиолокации, что делает курс «Средства интроскопии» естественным обобщением знаний и навыков, полученных студентами направления «Радиотехника» на младших курсах. Изучение дисциплины базируется на курсе «Основы радиотехнических систем», который, в свою очередь, опирается на целый ряд естественнонаучных, общепрофессиональных и специальных дисциплин.

Основная часть дисциплины «Средства интроскопии» посвящена ультразвуковым средствам интроскопии, что требует предварительного изучения отдельных разделов физической акустики. Поэтому необходимые сведения по физической акустике также включены в программу.

Самостоятельное освоение данной дисциплины студентами заочной формы обучения базируется на трех формах работы:

- 1) самостоятельная работа с литературой, указанной ниже в списке рекомендованной литературы, по каждой теме настоящей программы;
- 2) выполнение контрольных заданий;
- 3) выполнение реферата.

В период сессии по наиболее трудным для усвоения разделам читаются лекции. Каждый студент выполняет и защищает лабораторные работы, а также защищает выполненный в течение семестра реферат. По всем разделам курса студенты получают консультации у преподавателя.

# **1. ПРОГРАММА КУРСА «СРЕДСТВА ИНТРОСКОПИИ» ПО РАЗДЕЛАМ**

## **Раздел 1. Введение**

Классификация методов интроскопии. Трансмиссионная, эмиссионная, эхолокационная интроскопия и реконструктивная томография. Основные качественные показатели и параметры систем интроскопии. Принцип действия и основные параметры систем ультразвуковой эхолокационной томографии в медицине и неразрушающем контроле.

Литература: [1] стр. 1–10; [4] стр. 5–40; [6]; [7]; [9].

## **Раздел 2. Физические основы акустики**

Основные акустические характеристики твердых, жидких и газообразных сред. Деформация, напряжение. Закон Гука. Волновое уравнение. Решение волнового уравнения для плоской продольной волны. Основные соотношения между параметрами волны. Волновое сопротивление. Интенсивность плоской волны. Скорость звука в жидкостях и газах. Отражение, прохождение и преломление плоских волн на границе раздела сред.

Затухание и поглощение ультразвуковых волн в жидкостях, газах и биологических средах. Частотные зависимости затухания. Зависимость глубины зондирования ультразвукового эхолокатора от частоты.

Основные характеристики сферических ультразвуковых волн. Рассеяние ультразвуковой волны на неоднородностях плотности и сжимаемости. Сечение рассеяния. Одиночные рассеиватели. Модели дискретных рассеивателей. Угловая и частотная зависимость рассеивания. Модели биологических тканей.

Литература: [2] стр. 19–27, 53–62, 199–215; [3] стр. 20–25, 44–52, 141–158, 171–180, 202–208, гл. 4, 6.

## **Раздел 3. Ультразвуковые преобразователи**

Электроакустические преобразователи и их основные характеристики. Пьезоэлектрические преобразователи. Виды эквивалентных схем преобразователей. Способы электрического и акустического согласования. Просветляющие слои. Параметры пьезопреобразователей.

Литература: [1] гл. 2; [5] стр. 238–258.

#### **Раздел 4. Приемники и излучатели ультразвуковых волн**

Плоские поршневые излучатели. Поле излучения и приема на оси излучателя. Зоны Френеля и Фраунгофера. Фокусирующие преобразователи. Акустические линзы. Многоэлементные ультразвуковые преобразователи, акустические антенные решетки. Диаграмма направленности. Разрешающая способность. Проблема боковых лепестков. Динамическая фокусировка. Сканирование и методы обзора в ультразвуковой эхолокации. Линейное, секторное и конвексное сканирование. Механическое и электронное сканирование. Техническая реализация методов электронного сканирования.

Литература: [1] гл. 3; [3] стр. 196–201; [5] стр. 238–258; [9] стр. 42–59, 69–90.

#### **Раздел 5. Ультразвуковые эхолокаторы**

Принципы построения и параметры ультразвуковых эхолокаторов. Основные требования и параметры. Выбор частоты, интенсивности, чувствительности и параметров сигнала. Выбор и анализ методов сканирования и антенной системы. Функциональные схемы ультразвуковых эхолокаторов, устройств обработки сигналов и их отображения.

Литература: [1]; [9].

#### **Раздел 6. Допплеровские методы в ультразвуковой эхолокации**

Назначение и основные параметры доплеровских измерителей. Непрерывный и импульсный режим измерителей. Предельно достижимые параметры измерителей и области их применения. Совмещение режима обзора и измерения. «Цветные» доплеровские измерители скорости кровотока.

Литература: [2] гл. 11; [9] гл. 4, 5.

#### **Раздел 7. Обзор современных ультразвуковых систем интроскопии**

Современные системы ультразвуковой эхолокационной аппаратуры. Ультразвуковые томографы в медицине. Классические методы использования диагностических приборов. Эксплуатация, безопасность и поверка ультразвуковых приборов. Использование ультразвуковых приборов в системах неразрушающего контроля и дефектоскопии.

Литература: [1] стр. 259–263; [4]; [7]; [8] гл. 12, 17; [9] гл. 2, 6, 8.

## 2. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ

Номер варианта контрольных заданий следует выбирать по порядковому номеру студента в списке группы.

В Приложении приведена справочная таблица значений скорости звука и волнового сопротивления для некоторых материалов и сред.

### Задание №1. (Раздел 1. Тема: Основные качественные показатели и параметры систем интроскопии)

Определить «идеальную» разрешающую способность по дальности  $\delta R_{\text{ид}}$  ультразвукового эхолотатора при работе в среде со скоростью звука  $c$ , м/с. Зондирующий сигнал считать импульсом с прямоугольной огибающей и высокочастотным заполнением на частоте  $f$ , МГц. Длительность импульса составляет  $N$  периодов высокочастотного заполнения.

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$c$ , м/с	1500	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
$f$ , МГц	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$c$ , м/с	3500	3700	3900	4100	4300	1500	1700	1900	2100	2300
$f$ , МГц	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
$N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$c$ , м/с	2500	2700	2900	3100	3300	3500	3700	3900	4100	4300
$f$ , МГц	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0
$N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

### *Методические указания к заданию №1*

Разрешающая способность по дальности – это минимальная разность расстояний до двух объектов, имеющих одинаковые угловые координаты (расположенных друг за другом в радиальном направлении), при которой возможно раздельное наблюдение сигналов от этих объектов. Два точечных объекта с одинаковыми угловыми координатами и их отметки для идеализированного случая сигналов прямоугольной формы и неискажающего приемно-индикаторного тракта изображены на рис. 1 а, б.

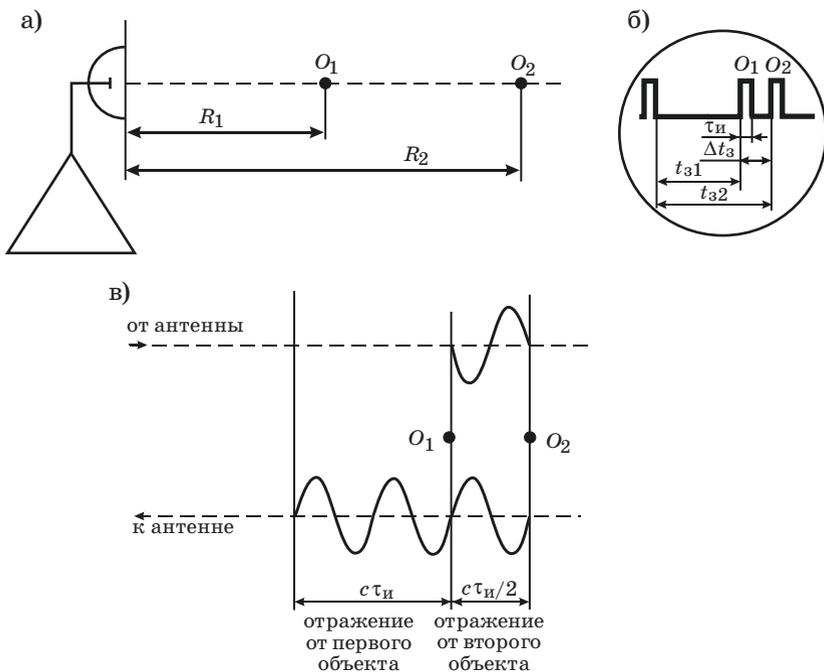


Рис. 1. Расположение двух объектов с одинаковыми угловыми координатами (а) и их отметки на экране индикатора (б), отражение импульса длительностью  $\tau_n$  от объектов, разделенных интервалом  $c\tau_n/2$  (в)

Так как согласно рис. 1 а, б расстояние между сигналами на временной оси  $\Delta t_3 = t_{32} - t_{31} = 2(R_2 - R_1)/c$ , и для разрешаемых сигналов должно быть больше длительности импульса  $\tau_n$ , то условие разрешения состоит в том, чтобы расстояние между целями удовлетворяло неравенству  $R_2 - R_1 > c\tau_n/2$ . Отсюда разрешающая способность по дальности, которую в данном случае можно условно назвать идеальной (т. к. не учитывается влияние приемника и индикатора), равна  $\delta R_{ид} = c\tau_n/2$ . Как видно из рис. 1, в,  $c\tau_n/2$  – это максимальный интервал между объектами, при котором они еще одновременно участвуют в формировании отраженного сигнала, т. к. в этом случае совпадают срезы (окон-

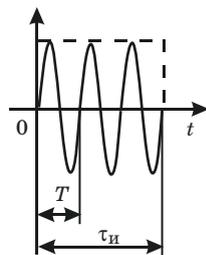


Рис. 2. Импульс с прямоугольной огибающей и высокочастотным заполнением

чение) импульса, отраженного от объекта  $O_1$ , и фронт (начало) импульса от объекта  $O_2$ .

В условии задачи длительность импульса задана через количество периодов высокочастотного заполнения с частотой  $f$  (рис. 2). Период  $T$  связан с частотой  $f$  известным соотношением по определению:  $T = 1/f$ .

**Задание №2. (Раздел 2. Тема: Основные акустические характеристики твердых, жидких и газообразных сред)**

Каким длинам волн  $\lambda$  соответствует интервал частот от  $f_1 = 20$  Гц до  $f_2 = 20$  кГц в средах с плотностью  $\rho$  и волновым сопротивлением  $z$ ?

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\rho \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
$z \cdot 10^6, \text{ кг/м}^2\text{с}$	1,5	2,0	23,3	14,5	43,7	32,7	39,0	19,5	28,6	36,0
№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\rho \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3$	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5
$z \cdot 10^6, \text{ кг/м}^2\text{с}$	30,4	44,1	46,9	38,2	41,9	65,3	25,4	15,9	50,3	99,7
№ вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\rho \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3$	0,7	1,2	1,7	2,2	2,7	3,2	3,7	4,2	4,7	5,2
$z \cdot 10^6, \text{ кг/м}^2\text{с}$	0,9	2,0	15	25,9	12,4	28,6	12,3	21,5	18,3	41,2

**Методические указания к заданию №2**

Длина волны гармонического (монохроматического) волнового процесса – это наименьшее расстояние между поверхностями равных фаз. Длина волны соответствует расстоянию, которое волна проходит в среде за время, равное одному временному периоду соответствующего колебательного процесса:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}.$$

Скорость звука в среде  $c$  и ее волновое сопротивление  $z$  – основные характеристики, определяющие акустические свойства среды и не зависящие от параметров акустической волны.

Волновое сопротивление в газе и жидкости – отношение звукового давления в бегущей плоской звуковой волне к колебательной скорости частиц среды. Также волновое сопротивление равно произведению плотности среды на скорость звука в ней:

$$z = \frac{P}{v} = \rho c.$$

Волновое сопротивление в твёрдых телах для продольных волн – отношение механического напряжения, взятого с обратным знаком, к колебательной скорости частиц среды.

### Задание №3. (Раздел 2. Тема: Основные соотношения между параметрами волны)

Интенсивность плоской волны в воздухе равна  $I = 10^{-10}$  Вт/м<sup>2</sup>. Найти амплитуду смещения частиц (молекул) воздуха  $A$  относительно положения равновесия при нормальных условиях, амплитуду звукового давления  $p$  и амплитуду колебательной скорости  $v$  для частот  $f_1, f_2, f_3$ . Принять, что скорость звука в воздухе  $c = 343$  м/с, а плотность воздуха  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>.

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_1$ , Гц	20	40	60	80	100	120	140	180	200	220
$f_2$ , Гц	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800
$f_3$ , кГц	10,0	10,3	10,6	11,0	11,3	11,6	12,0	12,3	12,6	13,0
№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$f_1$ , Гц	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210
$f_2$ , Гц	3000	3200	3100	2900	2700	2500	2300	2100	3300	3400
$f_3$ , кГц	13,3	13,6	14,0	14,3	14,6	15,0	15,3	15,6	16,0	16,3
№ вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$f_1$ , Гц	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320
$f_2$ , Гц	3500	3600	3700	3800	3900	4000	4100	4200	4300	4400
$f_3$ , кГц	16,6	17,0	17,3	17,6	18,0	18,3	18,6	19,0	19,3	19,6

### Методические указания к заданию №3

Распространение акустической волны – это процесс, связанный с переносом механической (кинетической и потенциальной) энергии со скоростью звука  $c$  в среде. При этом важно помнить, что никакого переноса вещества среды, в которой распространяется акустическая волна, не происходит. При распространении волны происходит вовлечение частиц среды (атомов, молекул) в колебательное движение относительно положения равновесия в невозмущенной среде (рис. 3).

Такое колебательное движение характеризуется следующими параметрами акустической волны:

- амплитуда смещения частиц среды  $A$  относительно положения равновесия;
- амплитуда колебательной скорости частиц среды  $v$ ;

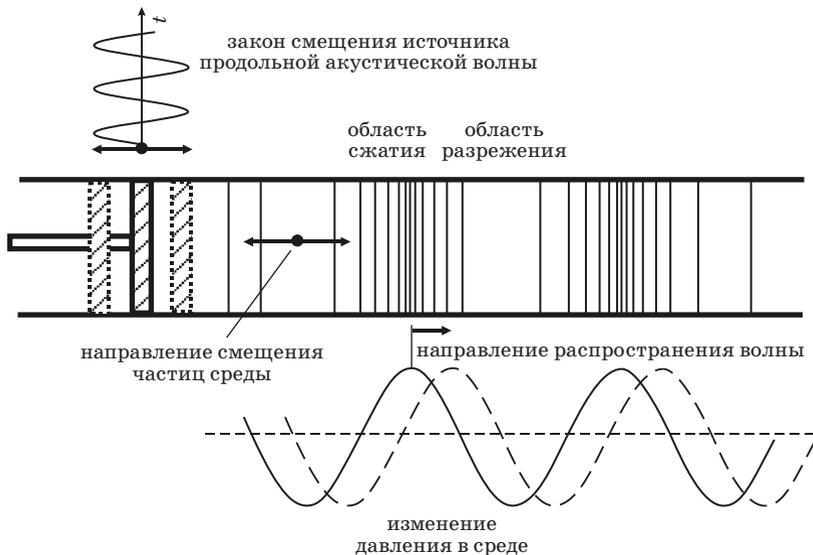


Рис. 3. Возбуждение и распространение продольной акустической волны в идеальном поршне

- амплитуда избыточного давления в среде  $p$ ;
- интенсивность акустической волны  $I$  – энергия, переносимая акустической волной в единицу времени через площадку единичной площади.

При распространении плоской акустической волны для перечисленных параметров справедливы следующие соотношения в линейном приближении:

$$v = \omega A = 2\pi f A,$$

$$p = \rho c v,$$

$$I = \frac{\rho c v^2}{2} = \frac{p^2}{2\rho c}.$$

#### Задание №4. (Раздел 2. Тема: Отражение, прохождение и преломление плоских волн на границе раздела сред)

Рассчитать коэффициенты прохождения и отражения плоской волны на границе двух сред при нормальном падении. Коэффици-

енты рассчитать по давлению, колебательной скорости и интенсивности. Среды заданы своими волновыми сопротивлениями  $z_1$  и  $z_2$ .

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$z_1 \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	1,5	2,0	23,3	14,5	43,7	32,7	39,0	19,5	28,6	36,0
$z_2 \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	3,1	3,3	15	25,9	12,4	28,6	12,3	21,5	18,3	41,2
№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$z_1 \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	30,4	44,1	46,9	38,2	41,9	65,3	25,4	15,9	50,3	99,7
$z_2 \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	43,7	32,7	39,0	19,5	28,6	30,4	44,1	46,9	38,2	41,9
№ вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$z_1 \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	0,9	2,0	15	25,9	12,4	28,6	12,3	21,5	18,3	41,2
$z_2 \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	1,5	2,0	23,3	14,5	12,3	21,5	18,3	41,2	14,5	43,7

### Методические указания к заданию №4

В неоднородной среде ультразвук отражается от акустических неоднородностей. Мерой акустической неоднородности является соотношение волновых сопротивлений на границе двух сред, а степень отражения характеризуется коэффициентами отражения  $R$  и прохождения  $D$ . Коэффициенты отражения и прохождения могут быть по давлению ( $R_p$  и  $D_p$ ), по скорости ( $R_v$  и  $D_v$ ) и по интенсивности ( $R_I$  и  $D_I$ ). Справедливы следующие соотношения:

$$R_p = \frac{P_{отр}}{P_{пад}} = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2}, \quad D_p = \frac{P_{пр}}{P_{пад}} = \frac{2z_2}{z_1 + z_2},$$

$$R_v = \frac{v_{отр}}{v_{пад}} = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2}, \quad D_v = \frac{v_{пр}}{v_{пад}} = \frac{2z_1}{z_1 + z_2},$$

$$R_I = \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2, \quad D_I = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2},$$

$$R_I + D_I = 1.$$

Таким образом, сильное отражение происходит на границе раздела сред, сильно различающихся по волновому сопротивлению (например, на границе «вода-воздух», «вода-твёрдое тело» и т. д.). Случаи прохождения ультразвукового сигнала из акустически «жесткой» среды в «мягкую» ( $z_1 \gg z_2$ ) и из акустически «мягкой» в «жесткую» ( $z_1 \ll z_2$ ) приведены на рис. 4.

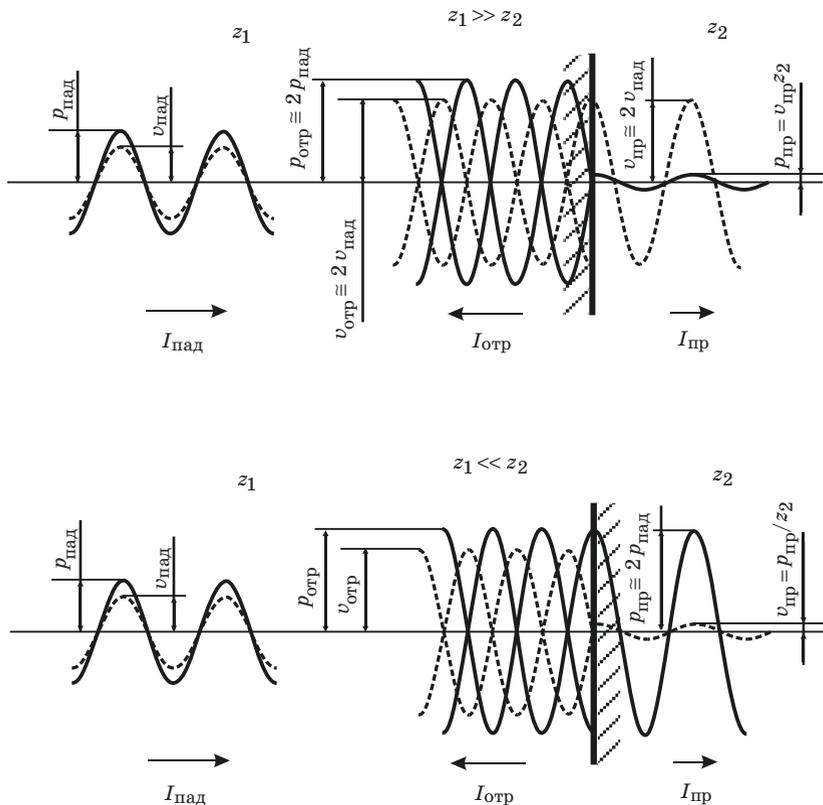


Рис. 4. Отражение и прохождение волны на границе двух сред

Если различие в волновых сопротивлениях сред незначительно, то отражение от неоднородности невелико и большая часть энергии проходит во вторую среду.

#### Задание №5. (Раздел 2. Тема: Отражение, прохождение и преломление плоских волн на границе раздела сред)

Рассчитать угол полного внутреннего отражения на границе раздела двух сред. Скорости звука в средах  $c_1$  и  $c_2$ . Указать, в которой из двух указанных сред, произойдет явление полного внутреннего отражения.

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$c_1$ , м/с	330	500	700	900	1100	1300	1500	2000	3000	3500
$c_2$ , м/с	350	700	900	1100	1300	1500	2000	3000	3500	4000
№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$c_1$ , м/с	4300	1000	1300	2300	2700	1300	1500	2000	3000	3500
$c_2$ , м/с	1500	2000	3000	3500	4200	4300	1000	1300	2300	2700
№ вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$c_1$ , м/с	700	900	1100	1300	1500	2000	3000	3500	4200	4300
$c_2$ , м/с	350	700	900	1100	1300	1500	2000	3000	3500	4000

### *Методические указания к заданию №5*

При наклонном падении плоской акустической волны на границу раздела двух сред луч из одной среды во вторую проходит по траектории, занимающей минимальное время. Это явление известно как принцип Ферма. Такое поведение волны описывается законом Снеллиуса (также Снелля или Снелла) для соотношения между углом падения  $\alpha$  и углом преломления  $\beta$ :

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{c_1}{c_2},$$

где  $c_1$  – скорость звука в первой среде,  $c_2$  – скорость звука во второй среде. На рис. 5, *а* и 5, *б* показаны случаи преломления при разных соотношениях между скоростями звука в средах.

Таким образом, угол преломления определяется соотношением:

$$\sin(\beta) = \sin(\alpha) \frac{c_2}{c_1},$$

что может привести к некорректному выражению для  $\sin(\beta)$  при  $c_2 > c_1$ . Действительно, как следует из последнего равенства, при  $c_2 > c_1$  всегда  $\beta > \alpha$ , следовательно, существует такой критический угол падения  $\alpha_{кр}$ , при котором  $\sin(\beta) = 1$ , т. е.  $\beta = 90^\circ$  и преломленный луч скользит вдоль границы раздела сред (рис. 5, *в*). При дальнейшем увеличении  $\alpha > \alpha_{кр}$  получается, что  $\sin(\beta) > 1$ , что невозможно. Физически это означает, что при  $\alpha > \alpha_{кр}$  волна не проходит во вторую среду (т. е. преломленная волна отсутствует), а полностью отражается от границы раздела сред и остается в первой среде (рис. 5, *г*).

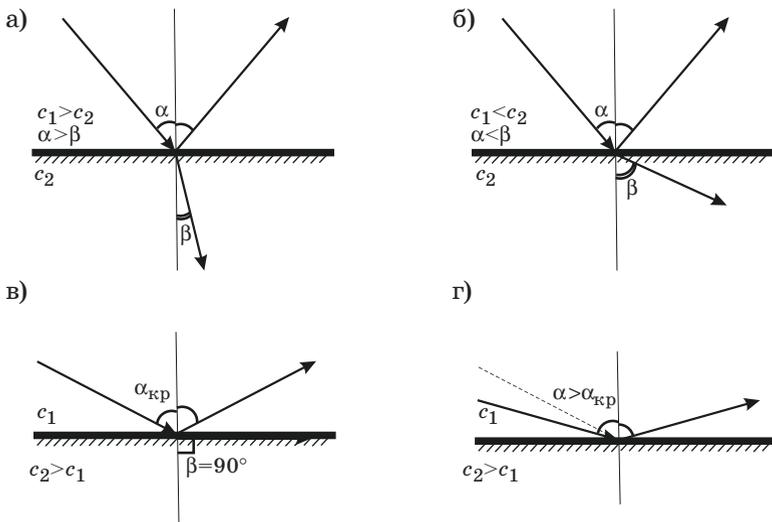


Рис. 5. Преломление плоской волны при наклонном падении на границу двух сред: разные соотношения между скоростями звука в средах (а, б), скольжение преломленной волны вдоль границы раздела сред при  $\alpha = \alpha_{кр}$  (в), явление полного отражения при  $\alpha > \alpha_{кр}$  (г)

Критический угол падения  $\alpha_{кр}$ , при котором  $\sin(\beta) = 1$ , называется углом полного внутреннего отражения и вычисляется по формуле:

$$\alpha_{кр} = \arcsin\left(\frac{c_1}{c_2}\right).$$

### Задание №6. (Раздел 3. Тема: Просветляющие слои)

Рассчитать волновое сопротивление  $z_3$  и толщину согласующего слоя  $d$  для передачи акустической энергии без потерь на рабочей частоте  $f$  из среды с волновым сопротивлением  $z_1$  в среду с волновым сопротивлением  $z_2$ . Выбрать из справочной таблицы в Приложении материал, наиболее подходящий для согласования. Оценить потери  $L$  (в процентах и дБ) при передаче энергии, вызванные «неидеальным» согласованием – неравенством рассчитанного волнового сопротивления  $z_3$  волновому сопротивлению выбранного материала.

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$z_1 \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	0,9	2,0	15	25,9	12,4	28,6	12,3	21,5	18,3	41,2
$z_2 \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	1,5	2,0	23,3	14,5	12,3	21,5	18,3	41,2	14,5	43,7
$f$ , МГц	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0
№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$z_1 \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	1,5	2,0	23,3	14,5	43,7	32,7	39,0	19,5	28,6	36,0
$z_2 \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	3,1	3,3	15	25,9	12,4	28,6	12,3	21,5	18,3	41,2
$f$ , МГц	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
№ вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$z_1 \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	30,4	44,1	46,9	38,2	41,9	65,3	25,4	15,9	50,3	99,7
$z_2 \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	43,7	32,7	39,0	19,5	28,6	30,4	44,1	46,9	38,2	41,9
$f$ , МГц	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0

### Методические указания к заданию №6

Для передачи акустической энергии между средами с существенно различающимися волновыми сопротивлениями используется согласующий (т. н. «просветляющий») слой (рис. 6).

В общем виде коэффициент прохождения по интенсивности для такой модели определяется выражением:

$$D_I = \frac{I_2}{I_1} = \frac{4z_1z_2}{(z_1 + z_2)^2 \cos^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) + \left(z_3 + \frac{z_1z_2}{z_3}\right)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)}.$$

Анализ этого выражения показывает, что если выбрать толщину согласующего слоя из условия  $d = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2}k$ , где  $k \in \mathbb{N}$ , то тогда

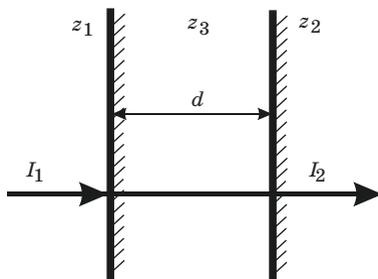


Рис. 6. Передача акустической энергии из одной среды в другую с помощью «просветляющего» слоя

$\cos^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)=0$ ,  $\sin^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)=1$  и становится возможным получить

$D_I = 1$ , что означает передачу акустической энергии из первой среды во вторую без потерь. Для этого нужно решить получившееся уравнение относительно  $z_3$  при  $D_I = 1$ :

$$\frac{4z_1z_2}{\left(z_3 + \frac{z_1z_2}{z_3}\right)^2} = 1,$$

$$z_3 = \sqrt{z_1z_2}.$$

Последнее выражение определяет волновое сопротивление «идеального» согласующего слоя.

В случае, если не удастся подобрать материал с «идеальным» волновым сопротивлением  $z_3$ , согласование будет неполным и не вся энергия пройдет во вторую среду. Численно это выразится через коэффициент прохождения  $D_I < 1$ :

$$D_I = \frac{4z_1z_2}{\left(z'_3 + \frac{z_1z_2}{z'_3}\right)^2},$$

где  $z'_3$  – волновое сопротивление реального материала согласующего («просветляющего») слоя.

Потери в процентах равны  $L = (1 - D_I) \cdot 100\%$ .

Потери в дБ равны  $L = 10 \cdot \lg(1 - D_I)$ .

### Задание №7. (Раздел 4. Тема: Фокусирующие преобразователи)

Рассчитать задержки на фокусировку ультразвукового луча многоэлементной линейной антенной решеткой (АР). Длина АР –  $L$ , число элементов АР –  $N$ . Скорость звука в рабочей среде –  $c$ . Луч сфокусировать на расстоянии  $R$  от плоскости АР.

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L$ , см	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
$N$	11	13	15	25	35	11	13	15	25	35
$c$ , м/с	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950
$R$ , см	10	11	12	13	14	3	4	5	6	7

№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$L$ , см	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
$N$	21	23	27	31	39	21	23	27	31	39
$c$ , м/с	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950
$R$ , см	3	4	5	6	7	10	11	12	13	14
№ вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$L$ , см	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
$N$	5	7	9	17	19	5	7	9	17	19
$c$ , м/с	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950
$R$ , см	8	9	10	11	12	7	9	10	15	12

### Методические указания к заданию №7

У любой антенны выделяют по дальности 3 зоны в распределении поля (рис. 7): ближнюю зону, зону Френеля и зону Фраунгофера (дальнюю зону).

В ближней зоне (несколько длин волн от поверхности антенны) волновой процесс еще не сформирован и работа невозможна.

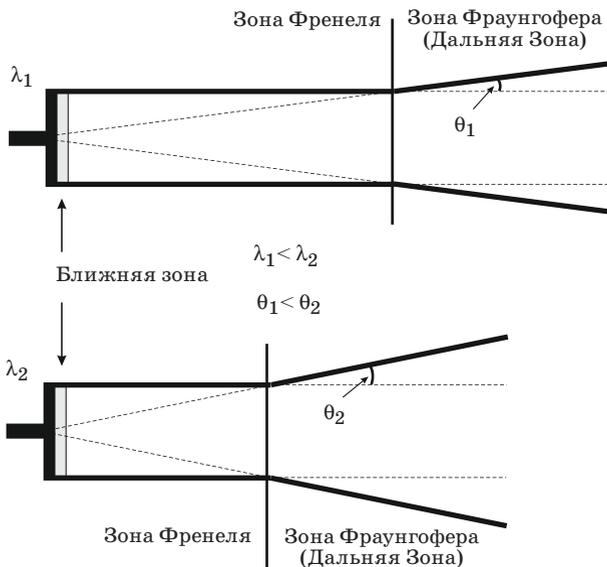


Рис. 7. Общий вид распределения поля по зонам для двух разных длин волн  $\lambda_1 < \lambda_2$

Дальняя зона (ДЗ) – зона работы подавляющего числа антенных систем при использовании электромагнитных волн. В дальней зоне фронт волны от любой антенны можно считать плоским – эта характерная особенность дальней зоны лежит в основе определения границы ДЗ, которая в общем виде зависит от соотношения между размером апертуры антенны и рабочей длиной волны. Также, именно для распределения поля в дальней зоне применяют термин «диаграмма направленности». Диаграмма направленности зависит от угловых координат и не зависит от расстояния до объекта.

Между ближней и дальней зонами находится зона Френеля, где принципиально можно работать, но фронт волны нельзя считать плоским. В зоне Френеля часто ведется работа ультразвуковых антенных систем. И именно в зоне Френеля возможно осуществлять фокусировку луча как с помощью линз, так и электронным образом для антенных решеток. В отсутствие фокусировки распределение поля в зоне Френеля носит «карандашный» характер – основная энергия сосредоточена в цилиндре, основанием которого является антенна.

Принцип электронной фокусировки антенной решеткой в зоне Френеля аналогичен принципу электронного управления лучом в дальней зоне и состоит во введении в отдельные каналы антенной решетки задержек (фазовых сдвигов – для монохроматических сигналов), компенсирующих разность хода лучей из каждого элемента антенной решетки до точки фокуса (рис. 8) так, что в точку фокуса сигналы от каждого элемента антенной решетки приходят синфазно (в один момент времени – для коротких сигналов).

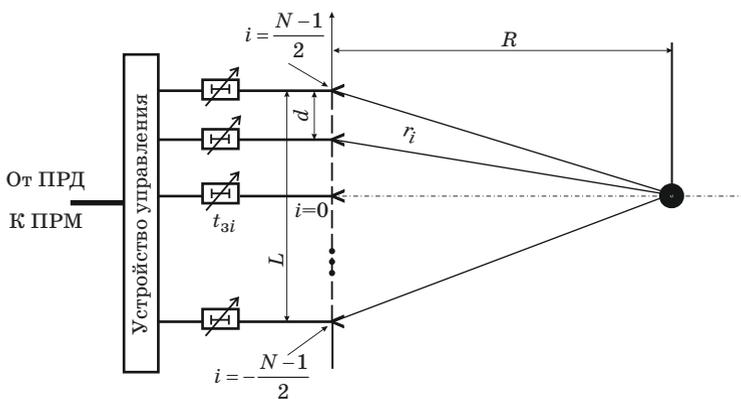


Рис. 8. Принцип электронной фокусировки

Как видно из рис. 8, задержки на фокусировку можно рассчитать из простых геометрических построений:

$$r_i = \sqrt{R^2 + (id)^2},$$

$$t_i = \frac{\sqrt{R^2 + (id)^2}}{c},$$

$$t_{zi} = \frac{\sqrt{R^2 + \frac{L^2}{2}}}{c} - \frac{\sqrt{R^2 + (id)^2}}{c},$$

где  $r_i$  и  $t_i$  – расстояние и время распространения сигнала между  $i$ -м излучателем АР и точкой фокусировки, соответственно,  $d = L/(N-1)$  – шаг решетки,  $t_{zi}$  – задержка в  $i$ -м элементе АР.

### Задание №8. (Раздел 5. Тема: Принципы построения и параметры ультразвуковых эхолотаторов).

При ультразвуковом зондировании сплошной среды сигнал был принят через время  $t$  после излучения. На какой глубине находится отражатель?

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t$ , мс	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Среда	медь	стек-ло	дере-во	же-лезо	вода	воз-дух	воль-фрам	алюми-ний	ней-лон	рези-на
№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$t$ , мс	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Среда	медь	стек-ло	дере-во	же-лезо	вода	воз-дух	воль-фрам	алюми-ний	ней-лон	рези-на
№ вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$t$ , мс	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Среда	медь	стек-ло	дере-во	же-лезо	вода	воз-дух	воль-фрам	алюми-ний	ней-лон	рези-на

### Методические указания к заданию №8

При расчетах воспользоваться формулами из методических указаний к заданиям №1 и №2.

Необходимые численные значения выбрать из справочной таблицы в Приложении.

**Задание №9. (Раздел 5. Тема: Выбор частоты, интенсивности, чувствительности и параметров сигнала)**

Известно, что ультразвуковой локатор должен обеспечивать рабочую дальность  $R_{\max}$ . Ультразвуковой локатор излучает в среду акустический сигнал с интенсивностью  $I_{\text{изл}}$ . Чувствительность приемного тракта  $I_{\text{min}}$ . Среднее значение коэффициента затухания в среде  $\alpha$ . Рассчитать максимально возможную рабочую частоту  $f_{\max}$  при условии линейной зависимости затухания от частоты.

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{\text{изл}}$ , мВт/см <sup>2</sup>	20	40	60	80	100	120	140	180	200	220
$I_{\text{min}}$ , мкВт/см <sup>2</sup>	5	4	3	2	1	5	4	3	2	1
$\alpha$ , дБ/смМГц	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$R_{\max}$ , см	20	25	30	35	40	15	20	25	30	35
№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$I_{\text{изл}}$ , мВт/см <sup>2</sup>	20	40	60	80	100	120	140	180	200	220
$I_{\text{min}}$ , мкВт/см <sup>2</sup>	10	9	8	7	6	10	9	8	7	6
$\alpha$ , дБ/смМГц	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$R_{\max}$ , см	20	25	30	35	40	15	20	25	30	35
№ вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$I_{\text{изл}}$ , мВт/см <sup>2</sup>	20	40	60	80	100	120	140	180	200	220
$I_{\text{min}}$ , мкВт/см <sup>2</sup>	11	12	13	14	15	11	12	13	14	15
$\alpha$ , дБ/смМГц	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
$R_{\max}$ , см	20	25	30	35	40	15	20	25	30	35

*Методические указания к заданию №9*

Затухание ультразвука происходит в любой среде распространения и обычно рассматривается как результат интегрального воздействия на ультразвуковой сигнал таких процессов как рассеяние на точечных отражателях, многократные переотражения, неупругие потери (преобразование упругой энергии в тепловую) и т. д.

Все это вместе и составляет коэффициент затухания, который имеет физический смысл затухания сигнала единичной частоты при прохождении расстояния, соответствующего единичной длине.

При прохождении расстояния  $R$  сигнал частотой  $f$  уменьшится по интенсивности следующим образом:

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{\alpha Rf}{10}},$$

где  $I_0$  – начальная интенсивность сигнала,  $I$  – интенсивность сигнала после прохождения среды с затуханием.

### Задание №10. (Раздел 6. Тема: Допплеровские измерители скорости кровотока)

Абсолютное значение (модуль) доплеровского сдвига частоты при отражении ультразвуковой волны от движущихся эритроцитов равен  $f_1$  кГц, частота генератора равна  $f_2$  МГц, датчик расположен под углом  $\varphi$  к направлению движения эритроцитов. Определить скорость и направление движения крови в кровеносном сосуде. Скорость звука в крови  $c = 1500$  м/с.

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_1$ , кГц	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$f_2$ , МГц	10	9,5	9	8,5	8	7,5	7	6,5	6	5,5
$\varphi$ , град	0	7	15	22	30	37	45	37	30	22
№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$f_1$ , кГц	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4
$f_2$ , МГц	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,2	1,0
$\varphi$ , град	15	7	0	180	170	160	150	140	150	160
№ вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$f_1$ , кГц	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
$f_2$ , МГц	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
$\varphi$ , град	170	180	355	350	345	340	335	340	345	350

#### Методические указания к заданию №10:

При движении источника или приемника излучения, а также при зондировании эхолокационным методом движущегося объекта (источник и приемник неподвижны, движется отражатель) частота принятого сигнала отличается от частоты излученного сигнала (рис. 9). Это явление носит название эффекта Допплера и широко используется для дистанционного измерения скорости движущегося объекта.

Для случая зондирования эхолокационным методом движущегося объекта частоты излученного и принятого сигналов связаны следующей зависимостью:

$$f_{\text{пр}} = f_{\text{изл}} \frac{c \pm v \cdot \cos(\varphi)}{c \mp v \cdot \cos(\varphi)},$$

где  $f_{\text{изл}}$  – частота излученного сигнала,  $f_{\text{пр}}$  – частота принятого сигнала,  $c$  – скорость звука в среде,  $v$  – скорость движения отражателя,  $\varphi$  – угол между направлением движения отражателя и линией, соединяющей отражатель и эхолотатор (рис. 9). Верхние знаки в числителе и знаменателе относятся к случаю приближения отражателя к эхолотатору, нижние – к случаю отдаления от него.

Разность между частотой принятого сигнала и частотой излученного сигнала называется доплеровским смещением (сдвигом) частоты и вычисляется по формуле:

$$F_{\text{Д}} = f_{\text{изл}} \frac{\pm 2v \cdot \cos(\varphi)}{c \mp v \cdot \cos(\varphi)} \approx f_{\text{изл}} \frac{\pm 2v \cdot \cos(\varphi)}{c},$$

где приближенное выражение используется на практике при  $c \gg v$ . В данной задаче приближение справедливо, т. к. скорость движения крови по сосудам значительно меньше скорости звука в крови.

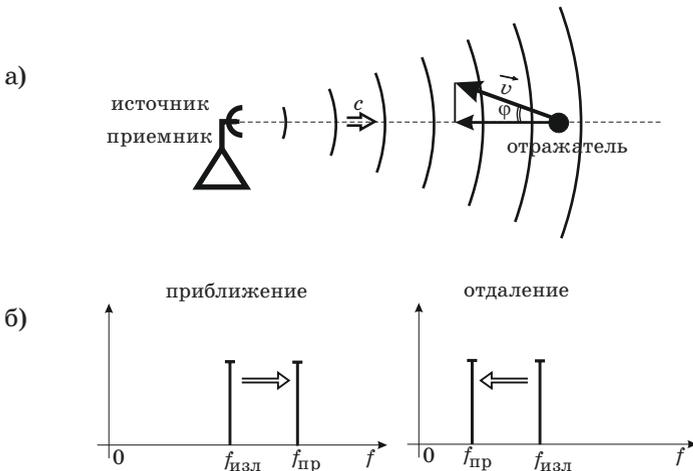


Рис. 9. Модель зондирования движущегося объекта (а) и спектры излученного и принятого монохроматических сигналов (б)

Справочная таблица

Материал	$z \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	$\rho \cdot 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	Материал	$z \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> с	$\rho \cdot 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>
Бериллий	23,3	1,8	Стекло	17,4	3,3
Свинец	14,2	11,4	Дерево	0,8	0,6
Кремний	43,7	2,3	Нейлон	2,0	1,1
Железо	46,9	7,8	Резина	0,03	0,9
Медь	31,9	8,9	Полиэтилен	3,2	1,2
Вольфрам	105,7	20,0	Вода	1,5	1,0
Алюминий	14,1	2,7	Воздух	$0,4 \cdot 10^{-3}$	0,001

Список литературы

1. *Домаркас, В. Й.* Ультразвуковая эхоскопия / В. Й. Домаркас, Э. Л. Пилецкас. Л.: Машиностроение, 1988. 276 с.
2. Применение ультразвука в медицине: Физические основы / Э. Миллер, К. Хилл, Дж. Бэмбер и др.; пер. с англ. Л. Р. Гаврилов, А. П. Сарвазян. – М.: Мир, 1989. 586 с.
3. *Шутилов, В. А.* Основы физики ультразвука / В. А. Шутилов. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1980. 280 с.
4. Физика визуализации изображений в медицине / под ред. Уэбба. М.: Мир, 1991. 408 с.
5. *Кайно, Г.* Акустические волны. Устройство, визуализация и аналоговая обработка сигналов / Г. Кайно, пер. с англ. С. Н. Карпачев, В. Г. Можаяев, И. Ю. Солодов; ред. О. В. Руденко. М., 1990. 656 с.
6. *Грегуш, П.* Звуковидение / П. Грегуш, ред. В. Д. Свет, пер. Н. В. Фадеева, Н. В. Зуйкова. М.: Мир, 1982. 232 с.
7. *Вайншток, И. С.* Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник / И. С. Вайншток, В. Г. Герасимов, Л. К. Гурвич. Под ред. В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 1976. 326 с.
8. Медицинская электронная аппаратура для здравоохранения / И. Кромвелл [и др.]; пер. М. К. Размахнин, ред. Р. И. Утямышева. М.: Радио и связь, 1981. 343 с.
9. *Осипов, Л. В.* Ультразвуковые диагностические приборы / Л. В. Осипов. М.: Изд-во ВИДАР, 1999. 256 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Программа курса «Средства интроскопии» по разделам .....	4
Раздел 1. Введение.....	4
Раздел 2. Физические основы акустики .....	4
Раздел 3. Ультразвуковые преобразователи.....	4
Раздел 4. Приемники и излучатели ультразвуковых волн .....	5
Раздел 5. Ультразвуковые эхолоты.....	5
Раздел 6. Доплеровские методы в ультразвуковой эхолокации ...	5
Раздел 7. Обзор современных ультразвуковых систем интроскопии.....	5
2. Контрольные задания и методические указания к выполнению.....	6
Задание №1. (Раздел 1. Тема: Основные качественные показатели и параметры систем интроскопии) .....	6
Задание №2. (Раздел 2. Тема: Основные акустические характеристики твердых, жидких и газообразных сред) .....	8
Задание №3. (Раздел 2. Тема: Основные соотношения между параметрами волны) .....	9
Задание №4. (Раздел 2. Тема: Отражение, прохождение и преломление плоских волн на границе раздела сред) .....	10
Задание №5. (Раздел 2. Тема: Отражение, прохождение и преломление плоских волн на границе раздела сред).....	12
Задание №6. (Раздел 3. Тема: Просветляющие слои).....	14
Задание №7. (Раздел 4. Тема: Фокусирующие преобразователи)...	16
Задание №8. (Раздел 5. Тема: Принципы построения и параметры ультразвуковых эхолотов).....	19
Задание №9. (Раздел 5. Тема: Выбор частоты, интенсивности, чувствительности и параметров сигнала) .....	20
Задание №10. (Раздел 6. Тема: Доплеровские измерители скорости кровотока).....	21
Приложение.....	23
Список литературы .....	23