

## Рабочая программа дисциплины

**1. Название дисциплины:** Теоретические основы акустики, часть 2 (Распространение акустических волн в ограниченных средах)

### 2. Лекторы.

**2.1.** к.ф.-м.н., доцент Кравчун Павел Николаевич, кафедра акустики, [gedackt@mail.ru](mailto:gedackt@mail.ru), тел. 939-38-44.

**2.2.** к.ф.-м.н., с.н.с. Можяев Владимир Геннадиевич, кафедра акустики, [vgmozhaev@mail.ru](mailto:vgmozhaev@mail.ru), тел. 939- 29-27.

### 3. Аннотация дисциплины.

Спецкурс состоит в систематическом изложении базовых теоретических понятий и методов классической линейной акустики, позволяющих описать излучение и распространение звуковых волн в ограниченных средах (волноводах, резонаторах, замкнутых объемах) и твердых телах. Рассмотрение сопровождается математически строгим описанием явлений, а также анализом допущений и приближений, принятых при математической формулировке проблемы. Знание основных теоретических положений нужно как для последующего изучения студентами специальных курсов на кафедре акустики, так и для самостоятельной практической работы.

### 4. Цели освоения дисциплины.

В результате освоения дисциплины обучающийся приобретёт умение использовать методы математической физики для аналитического описания поведения акустических волн. Кроме того, прослушавший курс узнает о закономерностях излучения, распространения и рассеяния линейных акустических волн в различных условиях.

### 5. Задачи дисциплины.

Задачами курса являются: (1) систематическое изложение теории распространения акустических волн в ограниченных средах гидродинамического типа и твердых телах; (2) применение теории для решения типичных задач акустики, связанных с распространением волн в ограниченных средах; (3) знакомство с конкретными прикладными задачами акустики ограниченных сред, примерами из практической деятельности.

### 6. Компетенции.

#### 6.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.

ПК-1, ПК-6

Предполагается, что слушатели владеют базовыми методами математической физики, знают основы акустики и волновой физики.

#### 6.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.

ПК-3, ПК-4

Прослушавшие курс будут не только понимать принципы распространения волн в ограниченных средах и знать соответствующие прикладные задачи и методы их решения, но и познакомятся с перспективными методами, которые могут найти применение в ближайшем будущем.

### 7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен знать основные физические и математические модели, связанные с распространением акустических волн в ограниченных средах, методы математического описания акустических волн в волноводах, резонаторах, замкнутых объемах, пластинах и других твердых телах, свойства волн и принципы работы существующих устройств, используемых в акустике; уметь рассчитывать параметры звуковых полей,

формируемых при распространении волн в ограниченных средах, знать конкретные примеры из практики.

#### 8. Содержание и структура дисциплины.

Вид работы	Семестр			Всего
	7			
<b>Общая трудоёмкость, акад. часов</b>	72			72
<b>Аудиторная работа:</b>				
Лекции, акад. часов	36			36
Семинары, акад. часов				
Лабораторные работы, акад. часов				
<b>Самостоятельная работа, акад. часов</b>	36			36
<b>Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)</b>	зач.			

№ раздела	Наименование раздела	Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий		Форма текущего контроля
		Аудиторная работа		
		Лекции	Самостоятельная работа	
1	Акустические волны в ограниченных жидких средах. Регулярные волноводы	<p><i>Лекция №1 (2 часа)</i>            Нормальные волны в однородных волноводах с акустически жесткими стенками. Распространяющиеся и нераспространяющиеся моды. Критические частоты. Дисперсия нормальных волн. Фазовая и групповая скорости. Асимптотика высоких частот.</p>	<p><i>(2 часа)</i>            Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции.</p>	ДЗ, КР
		<p><i>Лекция №2 (2 часа)</i>            Нормальная волна как суперпозиция плоских волн. “Лучи” Бриллюэна. Волны в плоском слое, хотя бы одна из границ которого является акустически мягкой (модель мелкого моря). Критические частоты. Низкочастотная полоса «непропускания» слоя. Асимптотика больших расстояний.</p>	<p><i>(2 часа)</i>            Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции</p>	
2	Волны в отрезках труб. Акустические четырехполюсники. Резонаторы	<p><i>Лекция №3 (2 часа)</i>            Отрезок трубы как четырехполюсник. Характеристическая матрица четырехполюсника. Входной импеданс. Резонансные частоты отрезка трубы при разных импедансах нагрузки (спектр собственных частот открытой и закрытой трубы). Теорема Фостера.</p>	<p><i>(2 часа)</i>            Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции.</p>	ДЗ, КР
		<p><i>Лекция №4 (2 часа)</i>            Нерегулярные волноводы (волноводы со скачками сечения). Эффект трансформации импедансов в волноводе со скачком сечения. Резонатор Гельмгольца. Собственная частота резонатора Гельмгольца.</p>	<p><i>(2 часа)</i>            Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции</p>	
3	Волноводы с медленно меняющимся сечением.	<p><i>Лекция №5 (2 часа)</i>            Уравнение распространения волн в волноводе с медленно меняющимся сечением (уравнение Вебстера). Общее решение уравнения Вебстера. Эффективный радиус волновода, фактор формы. Критическая частота волновода, полоса «непропускания» волновода с переменным сечением.</p>	<p><i>(2 часа)</i>            Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции</p>	ДЗ, КР
		<p><i>Лекция №6 (2 часа)</i>            Частные случаи волноводов с медленно меняющимся сечением: конический, экспоненциальный, катеноидальный волноводы. Решения уравнения Вебстера для них. Рупоры и кон-</p>	<p><i>(2 часа)</i>            Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции</p>	

		центраторы. Входной импеданс рупора, его зависимость от геометрии рупора и частоты. Входной импеданс конического рупора, особенности конического рупора (отсутствие критической частоты). Коэффициент отдачи рупоров. Примеры практического применения рупоров и концентраторов в акустике и технике измерений.		
4	Понятие о согласовании	<i>Лекция №7 (2 часа)</i> Плоскопараллельный слой, его характеристическая матрица, входной импеданс. Задача об одночастотном согласовании двух сред с помощью плоскопараллельного слоя и ее решение. Четвертьволновый согласующий слой. Представление о многочастотном согласовании и согласовании в полосе частот. Примеры применения согласующих систем.	<i>(2 часа)</i> Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции	ДЗ
5	Звуковые поля в замкнутых объемах. Реверберация.	<i>Лекция №8 (2 часа)</i> Методы описания волновых полей в замкнутых объемах (помещениях). Основы статистической теории реверберации. Диффузное поле. Уравнение баланса звуковой энергии в замкнутом объеме. Стандартное время реверберации. Формула Сэбина. Связь коэффициента звукопоглощения материала с импедансом поверхности. Локально реагирующий импеданс.	<i>(2 часа)</i> Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции. Подготовка к коллоквиуму.	ДЗ, К
		<i>Лекция №9 (2 часа)</i> <i>(1 час)</i> Основы волновой теории реверберации. Аксиальные, тангенциальные, косые моды. Реверберация мод. Основные критерии акустического качества помещений. <i>(1 час)</i> . Коллоквиум по разделам 1-5 с решением задач по всем разделам. Общая дискуссия по разделам 1-5.	<i>(2 часа)</i> Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Подготовка к коллоквиуму.	
6	Упругие волны в изотропных твердых телах.	<i>Лекция №10 (2 часа)</i> Тензоры деформации и напряжения. Закон Гука. Уравнения движения изотропных твердых тел. Продольные и поперечные волны в твердых телах.	<i>(2 часа)</i> Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции	ДЗ, КР
7	Отражение и преломление акустических волн на границах раздела сред.	<i>Лекция №11 (2 часа)</i> Граничные задачи акустики твердого тела. Условия на границах раздела.	<i>(2 часа)</i> Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции	ДЗ, КР
		<i>Лекция №12 (2 часа)</i> Отражение горизонтально и вертикально поляризованных сдвиговых волн от свободной границы твердого тела.	<i>(2 часа)</i> Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции	
8	Распространение	<i>Лекция №13 (2 часа)</i>	<i>(2 часа)</i>	

	акустических волн в ограниченных твердых телах.	Метод отражения в задачах распространения граничных волн. <i>Лекция №14 (2 часа)</i> Акустические волны на свободной поверхности твердого тела, на границах раздела твердых тел, твердого тела и жидкости.	Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции <i>(2 часа)</i> Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции	ДЗ, КР
9	Упругие волны в твердых пластинах.	<i>Лекция №15 (2 часа)</i> Определение характеристик горизонтально поляризованных мод методов потенциалов. <i>Лекция №16 (2 часа)</i> Дисперсионные соотношения Рэлея-Лэмба.	<i>(2 часа)</i> Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции <i>(2 часа)</i> Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции	
10	Вертикально поляризованные моды твердых пластин.	<i>Лекция №17 (2 часа)</i> Продольные и изгибные волны в твердых пластинах. <i>Лекция №18 (2 часа)</i> <i>(1 час)</i> Волны Лява: парциальное представление и дисперсионные свойства. <i>(1 час)</i> . Коллоквиум по разделам 6-10 с решением задач по всем разделам. Общая дискуссия по разделам 6-10. Круглый стол.	<i>(2 часа)</i> Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции. Подготовка к коллоквиуму. <i>(2 часа)</i> . Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение задач по теме лекции. Подготовка к коллоквиуму.	К

**Предусмотрены следующие формы текущего контроля успеваемости:**

1. Домашнее задание (ДЗ);
2. Коллоквиум (К);
3. Контрольная работа (КР);

## 9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО

1. Дисциплина по выбору (без альтернативы).
2. Вариативная часть, профессиональный блок, спецкурс кафедры.
3. Изложение опирается на знания, полученные студентами ранее в дисциплинах по математической физике и вводном курсе кафедры «Введение в акустику». Кроме того, имеется связь с отдельными темами параллельно читаемого курса «Теория волн».

3.1. Дисциплины, которые должны быть освоены для начала освоения данной дисциплины:

Математический анализ, общий курс физики, курс теоретической механики, курс «Введение в акустику».

3.2. Дисциплины, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее:

Последующие спецкурсы кафедры акустики, научно-исследовательская практика, научно-исследовательская работа.

## 10. Образовательные технологии

Изложение в основном ведётся традиционным способом (с использованием мела и доски). Отдельные закономерности распространения волн иллюстрируются с использованием компьютерного проектора и крупноформатных цветных фотографий. Во время проведения двух коллоквиумов проводится общие дискуссии по темам соответствующих разделов спецкурса. В заключение проводится круглый стол с участием преподавателей кафедры.

## 11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

### Вопросы к зачету по спецкурсу «Теоретические основы акустики, часть 2 (Распространение акустических волн в ограниченных средах)»

1. Нормальные волны в волноводах постоянного сечения. Распространяющиеся и нераспространяющиеся моды. «Критические» частоты.
2. Нормальные волны в плоском слое с идеальными границами. Критические частоты. Низкочастотная полоса «непропускания» слоя. Асимптотика  $kr \gg 1$ .
3. Теория волновода конического сечения. Входной импеданс. Конический, экспоненциальный и катеноидальный рупоры.
4. Реверберация в замкнутых объемах (статистическая теория). Понятие о диффузном поле. Уравнение баланса звуковой энергии в замкнутом объеме, его решение.
5. Акустические резонаторы малых волновых размеров. Резонатор Гельмгольца (входной импеданс, резонансная частота).
6. Отражение плоской волны от жидкого плоскопараллельного слоя. Характеристическая матрица слоя. Входной импеданс слоя.
7. Прохождение плоской волны через соединение труб разных диаметров. Эффект трансформации импедансов.
8. Уравнение распространения волн в волноводе с медленно меняющимся поперечным сечением (уравнение Вебстера), его частные решения.
9. Акустическое согласование. Одночастотное согласование двух сред с помощью плоскопараллельного слоя.
10. Акустические поля в замкнутых объемах. Основы статистической теории реверберации (асимптотика высоких частот, формула Сэбина). Стандартное время реверберации.
11. Собственные колебания в прямоугольных помещениях. Аксиальные, тангенциальные и косые моды. Реверберация мод.
12. Дисперсия нормальных волн в волноводе постоянного сечения. Фазовая и групповая скорости. Разложение нормальной волны на сумму плоских волн. "Лучи" Бриллюэна.

13. Отрезок волновода постоянного сечения как четырехполюсник. Характеристическая матрица, входной импеданс отрезка волновода (низкочастотное приближение).
14. Тензоры деформации и напряжения. Закон Гука для изотропных тел.
15. Модули упругости при различных деформациях изотропных твердых тел (безграничное тело, пластина, стержень).
16. Метод поверхностей рефракции для анализа отражения и преломления упругих волн. Общие закономерности отражения и преломления акустических волн на границах изотропных тел (условия фазового синхронизма, связь углов отражения и преломления, трансформация типов волн, критические явления).
17. Продольные и поперечные волны в твердых телах (уравнения движения, поляризация, связь между скоростями).
18. Волны Стоунли: условия существования, структура смещений и дисперсионные соотношения.
19. Коэффициенты отражения SV-сдвиговых волн от свободной границы изотропного твердого тела. Критические и Брюстеровские явления при отражении.
20. Неоднородные упругие волны: фазовая скорость, поляризация, структура смещений и кривые рефракции.
21. Метод отражения в задачах распространения граничных волн. Комплексные углы отражения и неоднородные волны. Парциальное представление упругого возмущения на границе твердых тел. Определение скорости и поляризации граничной волны.
22. Волны Рэлея: решение методом отражения, дисперсионные характеристики и структура смещений.
23. Характеристики SH-мод в твердых пластинах (решение методом отражения, модовый состав, структура смещений).

#### Образцы задач для контрольных работ

1. Резонатор Гельмгольца имеет собственную частоту  $F_0=500$  Гц при температуре  $t_0=20^\circ\text{C}$ . Какова будет собственная частота этого резонатора, если он наполнен воздухом при температуре  $t_1=200^\circ\text{C}$  или  $t_2=-170^\circ\text{C}$ ? Воздух считать идеальным газом.
2. Найти углы наклона лучей Бриллюэна для моды порядка (1,0) в трубе прямоугольного сечения  $a \cdot b$  с жесткими стенками на частоте 20 кГц. Считать  $a=20$  см, скорость звука в воздухе  $c=340$  м/с.
3. Как изменится частота, на которой будет резонировать резонатор Гельмгольца, если его наполнить водородом вместо воздуха. Газы считать идеальными, плотность воздуха  $1,3$  кг/м<sup>3</sup>, водорода  $0,09$  кг/м<sup>3</sup>.
4. Найти входной акустический импеданс конического рупора ( $x_0=10$  см) в воздухе на частоте 50 Гц. Скорость звука в воздухе 340 м/с.

#### Вопросы к коллоквиумам по спецкурсу «Теоретические основы акустики, часть 2»

1. Дать определение среднего коэффициента поглощения поверхности в диффузном поле и найти его значение для стен (включая пол и потолок) помещения с площадью стен  $S$  и объемом  $V$ , если время реверберации в нём составляет  $T_p$ . Рассчитать для случая  $S=600$  м<sup>2</sup>,  $V=1000$  м<sup>3</sup>,  $T_p=1,5$  с.
2. Дать определение понятия согласования импедансов, сформулировать «принцип рас-согласования импедансов» в теории звуко- и виброизоляции, пояснить практическое значение согласования в задачах акустики. Найти толщину плоскопараллельного слоя и волновое сопротивление второй среды для слоя с волновым сопротивлением  $Z_0$  и скоростью звука  $c_0$ . Частота согласования равна  $f$ . Волновое сопротивление одной из сред равно  $Z_1$ .
3. Рассказать о практическом применении резонаторов к архитектурной и авиационной акустике. Сформулировать условие резонанса в терминах входного импеданса резонатора. Рассчитать собственную частоту воздушного резонатора в форме колбы с гор-

лом длиной  $l=10$  см, диаметром  $2r_0=4$  см и сферической полостью  $2R=20$  см. Размеры резонатора считать малыми в сравнении с длиной волны.

4. Пояснить условия применения модового и лучевого представлений звукового поля в слое жидкости, например, в мелком море. Показать качественно вертикальное распределение амплитуды звукового давления в трёх низших модах в идеальном плоском слое заданной толщины, если коэффициенты отражения (по давлению) на его верхней и нижней границах равны соответственно: а)  $K_1=K_2=-1$ ; б)  $K_1=K_2=1$ ; в)  $K_1=-1$ ,  $K_2=1$ .

### Образцы задач для самостоятельного решения (домашних заданий)

1. Найти область частот, в которой море глубиной  $H=75$  м с акустически мягким дном будет “запертым” для распространения акустических волн. Нарисовать распределение звукового давления по глубине для первых трёх мод и дисперсионные кривые для них (для фазовой и групповой скоростей). Дно считать плоским, скорость звука – постоянной по глубине ( $c=1500$  м/с).
2. Найти плотность среды, если резонатор Гельмгольца, имеющий цилиндрическое горло длиной 4 см и радиусом 1 см и полость объёмом  $1260$  см<sup>3</sup>, имеет при атмосферном давлении резонансную частоту 850 Гц (газ считать идеальным).
3. В сторону берегового шельфа, каменистое дно которого образует с горизонталью угол  $1,1^\circ$ , распространяется звук частотой 6 кГц от практически ненаправленного излучателя. Определить число незатухающих мод, приходящих в точки, расположенные на расстоянии соответственно 10 м и 50 м от берега. Найти углы наклона к горизонту лучей Бриллюэна на расстоянии 10 м от берега. Скорость звука в воде 1480 м/с.
4. Плоскопараллельный слой толщины  $l$  с волновым сопротивлением  $z_0$  и скоростью звука  $c_0$  согласует две среды, волновое сопротивление одной из которых равно  $z_1$ . Найти волновое сопротивление второй среды и частоту, на которой наблюдается согласование.
5. Найти нагрузку (импеданс)  $Z_l$  на конце отрезка трубы длиной  $l$  и сечением  $S$  ( $\sqrt{S} \ll \lambda$ ), при которой входной импеданс  $Z_0$  равен  $Z_l$ .
6. Определить частоты перехода и построить дисперсионные кривые для первых трех мод Лява в структуре CdS-SiO. Скорости поперечных волн в этих материалах равны, соответственно, 2.5 и 3.5 км/с.
7. Рассчитать частоту отсечки моды  $a_3$  в стальной пластине толщиной 1 см. Построить ее дисперсионную кривую.
8. Определить толщину алюминиевой пластины, в которой на частоте 1 МГц возможна упругая волна со скоростью, равной скорости звука в воздухе.
9. Чему равно приближенное значение фазовой скорости 5-й моды Сезавы в структуре ZnO-SiO на частоте 1000 МГц? Толщина пленки ZnO – 100 мкм. Скорости сдвиговых волн в пленке и подложке равны, соответственно, 3 и 3.5 км/с.

### 12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

Основная литература:

1. Исакович М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973.
2. Скучик Е. Основы акустики, т.1, 2. – М.: Мир, 1976.
3. Ржевкин С.Н. Лекции по теории звука. – М.: МГУ, 1960.
4. Pierce A. Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications. – Acoustical Society of America, 1989.
5. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. – М.: Наука, 1984.
6. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: АН СССР, 1957.
7. Морз Ф. Колебания и звук. М.: 1950.



8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1965.
9. Auld В.А., Acoustic fields and waves in solids, N.Y.: Wiley & Sons, v.II, 1974.
10. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. - М.: Наука, 1981.
11. Гринченко В.Т., Мелешко В.В. Гармонические колебания и волны в твердых телах. - Киев: Наук. думка, 1981.

Дополнительная литература:

1. Бриллюэн М., Пароди М. Распространение волн в периодических структурах. М.: Иностранная литература, 1959.
2. Крылов В.В. Основы теории излучения и рассеяния звука. – М.: МГУ, 1989.
3. Акустика в задачах (под ред. Гурбатова С.Н. и Руденко О.В.) – М.: Физматлит, 2009.

Интернет-ресурсы: <http://acoustics.phys.msu.ru>

### **13. Материально-техническое обеспечение**

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Учебная аудитория физического факультета (5-52, 5-18 или аналогичная).