

## Рабочая программа дисциплины

**1. Название дисциплины:** Теоретические основы акустики, часть 1  
(Излучение и рассеяние звуковых волн)

### 2. Лекторы.

**2.1.** к.ф.-м.н., доцент Румянцева Ольга Дмитриевна, кафедра акустики,  
burov@phys.msu.ru, тел. 939-30-81.

**2.2.** д.ф.-м.н., доцент Сапожников Олег Анатольевич, кафедра акустики,  
oleg@acs366.phys.msu.ru, тел. 939- 29-52.

### 3. Аннотация дисциплины.

Предметом курса является систематическое изложение базовых теоретических понятий и методов классической линейной акустики, позволяющих описать излучение, распространение и рассеяние звуковых волн в неограниченных жидких и газообразных средах с учетом наличия в них неоднородностей и рассеивателей. 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.

Данный курс позволяет получить базовые систематические знания по теоретической акустике жидких и газообразных сред. Из лекций студенты узнают о том, как применять классические методы математической физики для решения широкого класса задач излучения и рассеяния звуковых волн. Слушатели познакомятся с точными и приближенными методами теоретического исследования закономерностей распространения акустических волн в реальных условиях.

### 5. Задачи дисциплины.

Задачами курса являются: (1) систематическое изложение базовых теоретических понятий и методов классической линейной акустики; (2) изучение характерных закономерностей излучения и рассеяния акустических волн в жидких и газообразных средах.

### 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 научатся применять методы математической физики для решения широкого класса задач классической линейной акустики, касающихся излучения, распространения и рассеяния звуковых волн.

### 7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен знать базовые теоретические понятия и методы классической линейной акустики жидких и газообразных сред, а также уметь применять методы математической физики для расчёта параметров звуковых полей при их распространении в реальных условиях.

## 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>	экз.			

№ раздела	Наименование раздела	Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий		Форма текущего контроля
		Аудиторная работа	Самостоятельная работа	
		Лекции		
1	Звуковые волны	Лекция №1 (2 часа) Уравнения гидродинамики идеальных жидкостей и газов; приближение линейной акустики. Волновое уравнение и граничные условия для идеальных сред.	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы.	ДЗ, КР
		Лекция №2 (2 часа) Плоские и сферически-симметричные волны в однородной безграничной среде. Волновой импеданс. Ближнее и дальнее поле сферически-симметричной волны.	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение трёх задач по теме лекции.	
2	Отражение и преломление плоских волн	Лекция №3 (2 часа) Отражение и преломление плоских волн на плоских границах раздела жидких и газообразных сред.	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение трёх задач по теме лекции.	ДЗ, КР
		Лекция №4 (2 часа) Отражение от слоя и прохождение через него. Отражение плоских волн от сосредоточенных в тонком слое массы и упругости.	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение трёх задач по теме лекции.	
3	Излучение звука простейшими источниками	Лекция №5 (2 часа) Излучение звука пульсирующей сферой и совокупностью монополюсных излучателей. Излучение акустического диполя. Импеданс излучения. Функция Грина и ее пространственный спектр для однородной безграничной среды. Функции Грина для полупространств с жесткой и мягкой границей.	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение трёх задач по теме лекции.	ДЗ, КР
		Лекция №6 (2 часа) Теорема взаимности. Принцип Гюйгенса для внутренней и внешней областей. Условия излучения Зоммерфельда. Интеграл Релея. Излучение звука круглой поршневой диафрагмой в жестком экране; диаграмма направленности.	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Расчёт и построение графика диаграммы направленности круглого поршневого излучателя в жёстком экране.	
4	Дифракция звука	Лекция №7 (2 часа) Строгие и приближенные методы решения прямых задач дифракции и рассеяния. Приближение Кирхгофа.	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы.	ДЗ, КР
		Лекция №8 (2 часа) Дифракция на отверстиях, экранах и крупных препятствиях. Принцип Бабинне.	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы.	
5	Коллоквиум по первой части	(1 час) Письменная контрольная работа по первой части курса	(2 часа) Подготовка к письменной контрольной работе	

	курса	(1 час) Устный опрос и общая дискуссия по первой части курса.	(2 часа) Подготовка к устному опросу.	ДЗ, КР
6	Рассеяние звука на трёхмерных объектах	Лекция №9 (2 часа) Рассеяние звука на бесконечном круговом цилиндре, на сфере и на газовом пузырьке в жидкости.	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение трёх задач по теме лекции.	ДЗ, КР
		Лекция №10 (2 часа) Рассеяние в неоднородных средах. Уравнение Липпмана-Швингера и ряд Борна-Неймана. Классификация рассеивателей. Рассеяние на малых флуктуациях плотности и сжимаемости (приближение Борна).	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы.	
		Лекция №11 (2 часа) Метод граничных интегральных уравнений.	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы.	
7	Рассеяние звука неровными поверхностями	Лекция №12 (2 часа) Метод углового спектра. Рассеяние на малых случайных неровностях (метод возмущений).	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение трёх задач по теме лекции.	ДЗ, КР
		Лекция №13 (2 часа) Рассеяние на крупномасштабных неровностях (метод Кирхгофа).	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение трёх задач по теме лекции.	
8	Акустика неоднородной движущейся среды	Лекция №14 (2 часа) Вывод уравнения акустики неоднородной неподвижной среды. Лучевой подход к описанию акустических полей. Вывод уравнения эйконала в акустике. Определение луча. Уравнения эйконала и переноса и их физический смысл. Дифференциальное уравнение луча. Пределы применимости приближения геометрической акустики. Лучевая картина в подводном звуковом канале. Поведение лучей в стратифицированной атмосфере.	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение трёх задач по теме лекции.	ДЗ, КР
		Лекция №15 (2 часа) Вывод уравнения акустики неоднородной среды в случае, когда среда движется. Распространение звука в движущейся среде в лучевом приближении.	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение трёх задач по теме лекции.	
9	Излучение звука движущимися источниками	Лекция №16 (2 часа) Физические процессы, лежащие в основе процесса излучения волн движущимися источниками. Неоднородное волновое уравнение для акустического поля. Решение в виде запаздывающих потенциалов Льенара-Вихерта. Излучение звука движущимся точечным источником. Эффект Доплера. Излучение равномерно движущего-	(2 часа) Работа с лекционным материалом и чтение рекомендованной литературы. Решение трёх задач по теме лекции.	ДЗ, КР

		ся сверхзвукового источника; конус Маха.		
10	Коллоквиум по второй части курса	(1 час) Письменная контрольная работа по второй части курса	(2 часа) Подготовка к письменной контрольной работе	ДЗ, КР
		(1 час) Устный опрос и общая дискуссия по второй части курса.	(2 часа) Подготовка к устному опросу.	

**Предусмотрены следующие формы текущего контроля успеваемости:**

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

## **9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО**

1. Дисциплина является обязательной.
2. Вариативная часть, профессиональный блок, дисциплина профиля.
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» и «Применение ультразвука в медицине».

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

Математический анализ, общие курсы физики

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

Научно-исследовательская практика, научно-исследовательская работа.

## **10. Образовательные технологии**

Изложение в основном ведётся традиционным способом (с использованием мела и доски). Отдельные части курса сопровождаются презентациями с использованием компьютерного проектора, при этом особенности распространения и рассеяния волн иллюстрируются с помощью изображений и видеороликов. Перед началом каждой лекции проводится опрос по теме предыдущей лекции с общей дискуссией. Лекторы иллюстрируют ряд тем примерами из современных научных исследований по акустике и волновой физике. Во время проведения коллоквиума организуется круглый стол по теме курса и проводится письменная работа с вопросами теоретического минимума и задачами.

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

### **Вопросы к зачету по спецкурсу «Теоретические основы акустики, часть 1 (Излучение и рассеяние звуковых волн)»**

1. Уравнения гидродинамики идеальной жидкости, их линеаризация. Волновое уравнение и граничные условия в случае идеальных сред.
2. Плоские и сферически-симметричные волны в однородной безграничной среде, их основные свойства, волновой импеданс. Ближнее и дальнее поле сферически-симметричной волны.
3. Отражение и преломление плоских волн на плоской границе раздела двух жидких и газообразных сред.
4. Излучение пульсирующей сферы. Излучение монополя.
5. Излучение звука совокупностью монопольных излучателей. Излучение акустического диполя.
6. Функция Грина. Поведение пространственного спектра функции Грина для однородной безграничной среды. Теорема взаимности.
7. Функции Грина для полупространств с жесткой и мягкой границей. Интеграл Рэлея.
8. Принцип Гюйгенса для внутренней и внешней областей. Условия излучения Зоммерфельда.
9. Излучение круглой поршневой диафрагмы в жестком экране; поле на оси, диаграмма направленности.
10. Дифракция на отверстиях и экранах в приближении Кирхгофа. Принцип Бабиня.
11. Рассеяние звука на бесконечном круговом цилиндре; диаграмма направленности. Сечение рассеяния.
12. Уравнение Липпмана-Швингера; ряд Борна-Неймана. Борновское приближение рассеяния.

13. Метод граничных интегральных уравнений в теории излучения и рассеяния.
14. Угловой спектр волны и его использование для решения задачи излучения плоскостью.
15. Рассеяние на слабо шероховатой поверхности: метод Рэлея на примере расчета рассеяния плоской волны на абсолютно мягкой шероховатой поверхности.
16. Рассеяние на поверхности с крупномасштабными неровностями: метод касательной плоскости, расчет излучения в дальней зоне.
17. Приближение геометрической акустики для плавно неоднородной неподвижной среды: вывод уравнения эйконала и переноса.
18. Акустика неоднородной движущейся среды: схема применения метода геометрической акустики, связь фазовой и групповой скорости со скоростью ветра.
19. Излучение движущегося точечного источника. Особенности излучения сверхзвукового источника.
20. Эффект Доплера при движении точечного источника.

### Образцы задач для самостоятельного решения и контрольных работ

Задача 1. Интенсивность звука  $I = 0.1$  Вт/м<sup>2</sup>. Вычислить объемную плотность энергии  $E$ , амплитуду акустического давления  $p'_0$ , амплитуду смещения  $\xi_0$ , амплитуду скорости частиц среды  $v_0$  и амплитуду ускорения  $a_0$  в плоской волне на частоте  $f = 10$  кГц в воде и в воздухе. Найти число Маха. Скорость звука в воде  $c = 1500$  м/с, в воздухе  $c = 340$  м/с.

Задача 2. Получить выражение для коэффициента прозрачности (прохождения) по интенсивности  $W_I$  и коэффициента отражения по интенсивности  $V_I$  плоской волны при прохождении через плоскую границу раздела двух жидких сред.

Задача 3. Вычислить угол полного отражения звука с частотой 100 кГц на границе между водой и анилином. Определить фазу коэффициента отражения и глубину проникновения звука в анилин, на которой при угле падения  $80^\circ$  акустическое давление уменьшается в  $e$  раз. Поглощением звука в средах пренебречь. Плотности воды и анилина, соответственно,  $\rho_1 = 1$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 1.022$  г/см<sup>3</sup>, скорости звука  $c_1 = 1480$  м/с,  $c_2 = 1659$  м/с.

Задача 4. Плоская волна с волновым вектором  $\vec{k}_0 = k(\sin \theta, 0, -\cos \theta)$  падает на плоскую (в среднем) поверхность с шероховатостью, описываемой функцией  $\zeta(x, y) = a \cdot \sin^2(gx)$ , где  $a \ll \lambda$ ,  $2\pi/g \ll \lambda$ . Какова структура отраженной волны? В каких направлениях будет происходить рассеяние?

Задача 5. В плоскости  $z=0$  задана монохроматическая волна. Амплитуда волны постоянна в пределах прямоугольника размером  $a \times b$ :  $p = p_0$  при  $-a/2 \leq x \leq a/2$ ,  $-b/2 \leq y \leq b/2$ ; в остальных точках плоскости амплитуда  $p$  равна нулю. Найти выражение для углового спектра волны  $F_0(k_x, k_y)$ .

Задача 6. Написать уравнение неразрывности (закон сохранения массы) для жидкости или газа и вывести из него соответствующее линеаризованное уравнение для акустических возмущений. Считать, что звук распространяется в неоднородной движущейся среде, т.е. в исходном невозмущенном состоянии скорость, плотность, энтропия и давление в среде зависят от времени и координат.

## 12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

Основная литература:

1. Крылов В.В. Основы теории излучения и рассеяния звука. – М.: МГУ, 1989.
2. Исакович М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973.
3. Скучик Е. Основы акустики, т.1, 2. – М.: Мир, 1976.
4. Ржевкин С.Н. Лекции по теории звука. – М.: МГУ, 1960.
5. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. – М.: Наука, 1972.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика, Глава VIII: « Звук ». – М.: Наука, 1986.
7. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн, 2-е изд.. – М.: Наука, 1990.
8. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. – М.: Наука, 1984.
9. Шендеров Е.Л. Излучение и рассеяние звука. Л.: Судостроение, 1989.
10. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. – М.: Наука, 1981.
11. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: АН СССР, 1957.
12. Акустика в задачах, под ред. Гурбатова С.Н. и Руденко О.В. – М.: Наука-Физматлит, 1996.

Дополнительная литература:

1. Горюнов А.А., Сасковец А.В. Обратные задачи рассеяния в акустике. М.: МГУ, 1989.
2. Хенл Х., Мауэ А., Вестпфаль К. Теория дифракции, М.: Мир, 1969. Гл. I, 3а; Гл. II, 1; Гл. III, 1а, 2а, 4а (п.76).
3. Pierce A. Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications. – Acoustical Society of America, 1989.
4. Осташев В.Е. Распространение звука в движущихся средах. – М.: Наука, 1992.

Периодическая литература:

Научные журналы по акустике: Акустический журнал и Journal of the Acoustical Society of America

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

## 13. Материально-техническое обеспечение

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

Учебная аудитория физического факультета