

Рабочая программа дисциплины

1. Название дисциплины: Нелинейные явления в акустике

2. Лекторы.

2.1. д.ф.-м.н., академик РАН, профессор Руденко Олег Владимирович, кафедра акустики, rudenko@acs366.phys.msu.ru, тел. 939-29-36

2.2. к.ф.-м.н., старш. науч. сотр. Гусев Владимир Андреевич, кафедра акустики, vgusev@bk.ru, тел. 939-29-43

3. Аннотация дисциплины.

В настоящее время интенсивные акустические волны активно используются в различных областях науки и техники, например в медицинской диагностике и терапии, неразрушающем контроле материалов и дефектоскопии, параметрических излучателях и приемниках для гидроакустических исследований, дистанционного мониторинга состояния земной коры и атмосферы. В данном курсе систематически излагается физика нелинейных акустических исследований в сплошных, прежде всего, жидких и газообразных средах. Рассматриваются основные математические модели, описывающие распространение и эволюцию волн большой интенсивности в однородных и неоднородных средах, и методы решения соответствующих нелинейных уравнений. затрагиваются вопросы распространения интенсивных волн в случайно-неоднородных средах. Большое внимание уделено практическим приложениям нелинейной акустики.

4. Цели освоения дисциплины.

В результате освоения дисциплины обучающийся приобретёт знания физических явлений, сопровождающих распространение интенсивных акустических волн, навыки применения соответствующих математических моделей нелинейных волновых процессов для исследования актуальных прикладных задач как акустики, так и смежных областей физики, овладеет современными математическими методами теории нелинейных волн.

5. Задачи дисциплины.

Задачами курса являются: (1) систематическое изложение современного состояния нелинейной акустики и ее актуальных задач; (2) ознакомление с методами решения задач нелинейной акустики, важных для практических приложений; (3) знакомство с конкретными прикладными задачами нелинейной акустики и примерами из практической деятельности; (4) приобретение навыков составления математических моделей и их упрощения и применения в самостоятельной работе методов решения уравнений нелинейной акустики.

6. Компетенции.

6.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.

М-ОНК-2; М-ИК-2; М-ПК-8;

6.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.

М-ИК-3; М-ПК-1; М-ПК-2; М-ПК-3; М-ПК-5; М-ПК-6; М-СПК-4

7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен знать физические явления, сопровождающие распространение нелинейных акустических волн, и основные математические модели;

владеть современными математическими методами решения задач теории нелинейных волн и нелинейной акустики и уметь применять их в самостоятельной работе;
иметь опыт решения задач, демонстрирующих основные закономерности нелинейных эффектов в сплошных средах.

8. Содержание и структура дисциплины.

Вид работы	Семестр				Всего
	1	2	3	4	
Общая трудоёмкость, акад. часов		72			72
Аудиторная работа:		34			34
Лекции, акад. часов		17			17
Семинары, акад. часов		17			17
Лабораторные работы, акад. часов					
Самостоятельная работа, акад. часов		38			38
Вид промежуточной аттестации (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)		экс.			

N раздела, название раздела	N темы	Название темы	Структура и содержание дисциплины				Форма текущего контроля успеваемости
			Содержание темы	Аудиторная нагрузка, отводимая на лекционный материал темы, ак.ч.	Названия семинаров по теме. Аудиторная нагрузка, отводимая на каждый семинар темы, ак.ч.	Самостоятельная работа: название темы самостоятельной работы; трудоемкость темы, ак.ч.	
1. Плоские нелинейные акустические волны в идеальной среде	1	Простые (римановы) волны в акустике.	Определение простых волн. Уравнения гидродинамики в представлении Эйлера и Лагранжа. Уравнение простых (римановых) волн. Основные нелинейные эффекты. Принцип суперпозиции. Коллинеарное и неколлинеарное взаимодействие акустических волн.	1 ак.ч.	Методы упрощения и решения нелинейных уравнений. Методы последовательных приближений, медленно изменяющегося профиля, характеристик. 2 ак.ч.	Точные и приближенные решения уравнений римановых волн с различным типом нелинейности. Графический анализ искажений профиля простой волны. Линеаризация уравнений. 4 ак.ч.	Об ДЗ, КР
	2	Волны с разрывами в профиле	Формирование разрыва в профиле простой волны. Правило равенства площадей. Уравнение движения разрыва в профиле волны. Формирование пилообразных волн. Разрыв в исходном синусоидальном профиле. Пилообразные и N-волны.	2 ак.ч.	Условия образования разрыва в профиле простой волны. Построение профилей разрывных волн. Абсолютно неупругий характер взаимодействия разрывов. 2 ак.ч.	Условия образования разрыва в профиле простой волны. Построение профилей разрывных волн. Величина скачка на фронте слабой ударной волны. Динамика и взаимодействия волн с разрывами 4 ак.ч.	Об ДЗ
2. Плоские волны в диссипативных средах	1.	Волны конечной амплитуды в диссипативных средах.	Уравнения Навье-Стокса. Уравнение Бюргера и его точные решения. Стационарные решения нелинейных уравнений. Подстановка Хопфа-Коула. Нелинейное поглощение. Решения Хохлова, Фей и поведение на предельно больших расстояниях.	2 ак.ч.	Автомодельные решения. Эффект насыщения. Обобщенное уравнение Бюргера. Эволюция однополярных и двуполярных импульсов. 2 ак.ч.	Предельное поведение исходно синусоидального профиля. Асимптотическое решение уравнения Бюргера при малой вязкости. 4 ак.ч.	Об, ДЗ, К
3. Многомерные нелинейные волны и ограниченные волновые пучки	1.	Сферически и цилиндрические волны конечной амплитуды.	Сферически и цилиндрически симметричные волны. Нелинейное волновое уравнение в сферических и цилиндрических координатах. Сходящиеся и расходящиеся волны.	1 ак.ч.	Условия образования разрыва. Обобщенное уравнение Бюргера. Двукратное образование ударного фронта 1 ак.ч.	Вывод эволюционных уравнений для многомерных волн. 2 ак.ч.	Об, ДЗ
	2	Нелинейные акустические пучки.	Уравнение Хохлова-Заболотской. Сфокусированные пучки. Приближенные решения уравнения Хохлова-Заболотской, нелинейные эффекты в пучках.	1 ак.ч.	Ограниченные волновые пучки нелинейных волн, нелинейные параметрические эффекты 1 ак.ч.	Гауссовские пучки. Дифференцирование профиля в фокусе. 2 ак.ч.	Об, ДЗ, КР
	3	Параметрические антенны	Основы теории параметрических излучателей и приемников звука. Модели излучающей и приемной параметрических антенн.	1 ак.ч.	Осевое распределение амплитуды и фазы волны разностной частоты. Диаграмма направленности. 1 ак.ч.	Решение уравнения ХЗК методом последовательных приближений. Параметрическая антенна в режиме излучения сложных сигналов. Приемные параметрические антенны. 2 ак.ч.	Об ДЗ

	4	Нелинейная геометрическая акустика	Нелинейная геометрическая акустика и волны в направляющих системах. Уравнения эйконала и переноса. Нелинейные волны и волновые пучки в неоднородных средах. Самовоздействие акустических волн. Тепловая самофокусировка. Нелинейные волны в трубах и рупорах.	1 ак. ч.	Эволюция пилообразной волны. Изотропизация диаграммы направленности нелинейного волнового пучка. 1 ак. ч.	Нелинейные лучевые координаты, правило характеристик Уизема, вторичные ударные волны. Вариационный метод Уизема, волны с отрицательной энергией. 2 ак. ч.	Об ДЗ
4. Нелинейные волны в структурно-неоднородных средах и средах с дисперсией	1	Нелинейные эффекты в структурно-неоднородных средах.	Нелинейные эффекты в структурно-неоднородных средах. Виды нелинейности: физическая, геометрическая, структурная, граничная и т.д. «Гигантская» нелинейность жидкости с пузырьками. Модельные задачи нелинейной диагностики материалов	2 ак. ч.	Нелинейные волны в среде с пузырьками. Расчет нелинейных параметров упругого слоя при акустическом облучении. Излучение звука поршнем при конечных смещениях. 1 ак. ч.	Элементы теории нелинейных акустических волн в твердых телах. Кубичная нелинейность. Определение предела прочности, сдвига частоты в резонаторе. Нелинейные стоячие волны. 4 ак. ч	Об ДЗ, КР
	2	Акустические волны конечной амплитуды в средах со слабой дисперсией.	Нелинейные акустические волны в среде со слабой дисперсией. Сильная и слабая дисперсия. Дисперсия в акустике: волны на поверхности жидкости, релаксационных процессах. Уравнения Кортевега-де-Вриза и Кортевега-де-Вриза-Бюргерса. Солитоны.	1 ак. ч.	Решение уравнения Кортевега-де-Вриза методом обратной задачи рассеяния Гельфанда - Левитана - Марченко. 1 ак. ч.	Волны в средах с дисперсией. Стационарное решение уравнения КДВ. Волны на поверхности жидкости конечной глубины. 4 ак. ч	Об ДЗ
5. Гидродинамические эффекты, связанные с нелинейными волнами	1	Гидродинамические и акустические ударные волны	Ударные волны. Законы сохранения на разрыве. Ударная адиабата. Изменение энтропии на фронте слабой ударной волны. Задача о сильном взрыве.	1 ак. ч.	Отражение волны конечной амплитуды от границы раздела. 1 ак. ч.	Взаимосвязь гидродинамических и акустических ударных волн. 2 ак. ч.	Об ДЗ
	2	Радиационное давление и акустические течения	Механизмы возникновения радиационного давления. Общая характеристика акустических течений. Течения в свободном пространстве (экартовские), в резонансных объемах (рэлеевские), около препятствий.	1 ак. ч.	Крупномасштабные течения, течения в стоячей волне и в акустическом пограничном слое. 1 ак. ч.	Движение частиц в акустическом поле. Уравнение колебаний частицы, гидродинамическое взаимодействие частиц при обтекания. 2 ак. ч.	Об ДЗ
6. Статистические явления	1	Статистические явления в нелинейной акустике	Случайно-модулированные волны. Акустические шумы большой интенсивности.	1 ак. ч.	Акустические волны в случайно-неоднородных средах. 1 ак. ч.	Спектр мощности и корреляционная функция нелинейных акустических полей. Взаимодействие случайных сигналов. 4 ак. ч.	Об ДЗ

Предусмотрены следующие формы текущего контроля успеваемости.

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

9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО

1. Обязательная дисциплина.
2. Вариативная часть, блок профессиональной подготовки, дисциплина магистерской программы

3. Курс связан с рядом дисциплин, преподаваемых на физическом факультете. К началу изучения курса студент должен владеть знаниями общей физики, механики сплошных сред, теоретической механики, теоретических основ акустики, теории колебаний, теории волн, нелинейной акустики, дифференциальных уравнений, методов математической физики, с которыми он методически связан.

3.1. Дисциплины, которые должны быть освоены для начала освоения данной дисциплины: дифференциальные уравнения, методы математической физики, общая физика, механика сплошных сред, теоретическая механика, введение в акустику, теоретические основы акустики, теория колебаний, теория волн, физическая акустика, физическая акустика твердого тела, нелинейная акустика.

10. Образовательные технологии

Изложение в основном ведётся традиционным способом (с использованием фломастеров, мела и доски), а также применяются современные информационные технологии, компьютерные презентации, электронные ресурсы. Курс дается в виде лекций, сопровождаемых самостоятельным решением задач. Во время проведения коллоквиума проводится общая дискуссия по темам соответствующих разделов курса. Преподавание дисциплины проводится в форме авторского курса по программам, составленным на основе результатов исследований научных школ МГУ.

11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

Примерный список вопросов и заданий для проведения текущей и промежуточной аттестации:

1. Вывести УПВ из модельного уравнения (1.13) методом медленно изменяющегося профиля.
2. Решить УПВ методом последовательных приближений для граничного условия $u(x=0) = u_0(t)$.
3. Решить УПВ методом последовательных приближений для граничного условия $u(x=0) = u_0 \sin \omega t$.
4. Решить УПВ методом последовательных приближений для граничного условия $u(x=0) = u \sin \omega_1 t + v \sin \omega_2 t$.
5. Проверить, что решением УПВ является неявная функция $u = \Phi\left(\tau + \frac{\varepsilon}{c_0^2} ux\right)$.
6. Перейдя к каноническим переменным $\tau = t - x/c_0$, $\eta = t + x/c_0$, найти частное решение неоднородного волнового уравнения с резонансной накачкой

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 4F(t - x/c_0).$$

Полный перечень вопросов к экзамену:

1. Основные понятия теории волн: уравнения гидродинамики, бегущие волны, простые волны, волновые пучки, волновое уравнение, оператор Лапласа, числа Маха, Рейнольдса.
2. Уравнения гидродинамики в переменных Эйлера и Лагранжа. Уравнение Ирншоу. Модельное нелинейное волновое уравнение.
3. Основные методы упрощения и решения уравнений нелинейной акустики (метод последовательных приближений, метод медленно изменяющегося профиля, метод характеристик). Малый параметр в уравнениях акустики.

4. Уравнение простых волн, неявное решение, метод характеристик и его геометрическая интерпретация, общая картина эволюции волны в рамках УПВ.
5. Явление волнового резонанса: тепловое возбуждение звука и нелинейные стоячие волны.
6. Основные отличия линейных и нелинейных волн. Нелинейные эффекты (принцип суперпозиции, искажение профиля, генерация гармоник, накопление нелинейных эффектов с расстоянием, образование разрывов, нелинейные искажения в звуковых пучках).
7. Приведение уравнений к безразмерному виду. Безразмерные параметры в основных уравнениях нелинейной акустики (УПВ, УБ, ХЗ, КдВ), их смысл, особенности поведения волны при разных значениях параметров.
8. Графический анализ искажений в профиле простой волны. Рассмотреть исходные синусоидальный, треугольный сигналы, N-волну и ударные волны разрежения и сжатия.
9. Спектр простой волны. Решение Бесселя-Фубини для исходного синусоидального сигнала. Спектр периодической и непериодической волн с произвольным начальным профилем.
10. Линеаризация уравнений гидродинамики в неподвижной среде и в среде с постоянным потоком. Введение малого параметра.
11. Скорость акустических волн. Линейные волны, простые волны, волны в вязкой нелинейной среде, линейные звуковые пучки, ударные волны.
12. Образование разрывов в простых волнах. Условия образования разрыва. Правило равенства площадей. Поведение ударного фронта в рамках УПВ и УБ.
13. Уравнение движения разрыва. Эволюция ударных волн сжатия и разрежения. Взаимодействие разрывов.
14. Образование разрыва в синусоидальной волне в идеальной среде. Профиль волны после образования разрыва, асимптотический пилообразный профиль.
15. Общая картина эволюции синусоидальной волны в нелинейной среде со слабым и сильным затуханием. Решения Хохлова и Фея.
16. Уравнение Навье-Стокса. Уравнение Бюргерса и его точное решение. Преобразование Хопфа-Коула. Автомодельные решения.
17. Решение Хохлова как асимптотическое решение уравнения Бюргерса при малой вязкости.
18. Особенности нелинейных сферических и цилиндрических волн. Условия образования разрыва.
19. Основные результаты линейной теории волновых пучков.
20. Уравнение Хохлова-Заболотской. Нелинейные искажения в пучках. Параметрические антенны.
21. Стационарные решения уравнений нелинейной акустики (УПВ, УБ, КдВ)
22. Основные идеи приближения геометрической акустики. Уравнения эйконала и переноса. Изотропизация диаграммы направленности.
23. Особенности распространения волн в трубах и рупорах. Обобщенное уравнение Бюргерса.
24. Обобщенное уравнение Бюргерса. Сферические и цилиндрические волны, волны в трубах и рупорах, волны в приближении нелинейной геометрической акустики. Ширина ударного фронта.
25. Слабые ударные волны, ширина фронта (плоские, сферические и цилиндрические волны).
26. Понятие об ударной адиабате. Законы сохранения на разрыве.
27. Структурная нелинейность жидкости с пузырьками.
28. Основные идеи методов нелинейной диагностики.

29. Акустические волны в средах с дисперсией. Причины появления дисперсии, сильная и слабая дисперсия. Основные идеи решения уравнения КдВ методом обратной задачи рассеяния.
30. Волны в неоднородных средах. Самофокусировка.

12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

12.1. При изучении курса основное внимание следует уделять физическим механизмам изучаемых явлений, их связи с нелинейными волновыми явлениями в смежных разделах физики, вопросам практического значения и применения изучаемых явлений.

12.2. Литература

Основная литература

1. Руденко О.В., Гурбатов С.Н., Хедберг К.М. Нелинейная акустика в задачах и примерах. М.: Физматлит, 2007.
2. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975
3. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966.
4. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.
5. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984.
6. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн.-- 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1990.
7. Акустика в задачах. Под. ред. С.Н. Гурбатова и О.В. Руденко. М.: Физматлит, 2009.
8. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Ленинград: Судостроение, 1981.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М., 1986
10. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1969.

Дополнительная литература

1. Исакович М.А. Общая акустика. М., 1973
2. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., 1966.
3. Накоряков В.Е., Покусаев В.Е., Шрейбер И.Р. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. Новосибирск. 1983.

Периодическая литература

1. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустики // УФН. 2006. Т.176. №1. С.77-95.
2. Статистические характеристики интенсивной волны за двумерным фазовым экраном // Акуст. журн. 2006. Т.52. №1. С.30–42.
3. К 40-летию уравнения Хохлова-Заболотской // Акуст. журн. 2010. Т.56. №.4. С.452-462.
4. Альтшулер Л.В. Применение ударных волн в физике высоких давлений // УФН. 1965. Т. 85. Вып 2. С. 197-258.

Интернет-ресурсы

1. <http://acoustics.phys.msu.ru>

13. Материально-техническое обеспечение

13.1. Помещения - учебная аудитория. Лекционные и семинарские занятия по дисциплине проводятся в соответствии с требованиями к материально-техническим условиям реализации

ООП (п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика»). Аудиторный фонд для проведения учебных занятий включает достаточное количество аудиторий для проведения лекций и семинарских занятий с количеством посадочных мест не менее 12 в каждой аудитории.

13.2. Оборудование – ПК, проектор, доступ к Интернету, доска, фломастеры или мел.

Специализированные компетенции профильной направленности обучения (специализированные компетенции магистерской программы)	
М-СПК-4	Способность активно использовать и применять на практике профессиональные знания по нелинейным волновым явлениям в сплошных средах, определяющим пространственно-временную структуру интенсивных акустических волн и полей, необходимые для решения научно-исследовательских и научно-инновационных задач как теории нелинейных волн, так и прикладных исследований в геофизике, медицинской акустике и других смежных областях; способность организовывать и планировать исследования распространения интенсивных акустических волн и их воздействия, ставить конкретные задачи научных исследований в области нелинейной акустики, решать их с помощью современных математических методов, оборудования и информационных технологий, применять навыки оформления их результатов в научных публикациях, статьях и докладах.

