

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА АКУСТИКИ**

УТВЕРЖДАЮ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

### **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

Наименование дисциплины:

**Нелинейные явления и волновая динамика в акустике**

---

Уровень высшего образования:

**Специалитет**

---

Специальность:

**03.05.02 Фундаментальная и прикладная физика**

Направленность (профиль)/специализация образовательной программы:

**Акустика**

---

Форма обучения:

**Очная**

---

Москва 2023

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по специальности 03.05.02 «Фундаментальная и прикладная физика», утвержденным приказом МГУ от 21.12.2018 г. № 1780.

Год (годы) приема на обучение \_\_\_\_\_

**Авторы–составители:**

1. Академик РАН, профессор, доктор физико-математических наук Руденко Олег Владимирович, кафедра акустики физического факультета МГУ
2. Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук Гусев Владимир Андреевич, кафедра акустики физического факультета МГУ

Заведующий кафедрой акустики  
д.ф.-м.н., профессор Руденко О.В.

## **Аннотация к рабочей программе 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. В курсе приведено систематическое изложение базовых знаний по современной нелинейной динамике, в первую очередь, нелинейным волновым и колебательным процессам, важным для акустики и ее практических применений. Даются сведения об основных типах нелинейных моделей сосредоточенных и распределенных систем и методы их анализа. Рассмотрены основные математические подходы к исследованию таких моделей и решению соответствующих нелинейных дифференциальных уравнений. Большое внимание уделено практическим аспектам теории и ее приложению к актуальным задачам в гидро-, аэро-, геоакустике и смежных областях физики.

Дисциплина реализуется на 5 курсе в 9 семестре специалитета, входит в вариативную часть и является обязательной для освоения обучающимися по специализации «Акустика».

Объем дисциплины составляет 3 з.е., в том числе 72 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 36 академических часов, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Промежуточная аттестация по дисциплине—экзамен в 9 семестре.

### 1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина «Нелинейные явления и волновая динамика в акустике» входит в вариативную часть программы по специальности «Фундаментальная и прикладная физика» (блок «Профессиональный», вариативная часть) и является обязательной для освоения обучающимися по специализации «Акустика».

### 2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Предполагается, что слушатели владеют базовыми методами математической физики, знают основы акустики и волновой физики, а также владеют знаниями общей физики, основ геофизики, механики сплошных сред, теоретической механики, теоретических основ акустики, теории колебаний, теории волн.

### 3. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с индикаторами достижения компетенций
		Знать: основы современной нелинейной акустики, основные явления и эффекты, связанные с распространением интенсивных и нелинейных акустических волн. Уметь: решать базовые задачи нелинейной акустики, актуальные для гидро-, аэро, геоакустики, строить базовые модели в указанных областях. Владеть: методами решения задач и прогнозирования основных явлений в нелинейной акустике, базовыми методами постановки и решения научно-исследовательских задач в указанных областях.

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 3 з.е., в том числе: 72 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 36 академических часов, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Контактная работа включает в себя занятия лекционного типа (лекции) и семинары.

5. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (ак.ч.)	В том числе					Самостоятельная работа обучающегося, академические часы	Форма текущего контроля успеваемости, наименование
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) <i>Виды контактной работы, академические часы<sup>1</sup></i>						
		Занятия лекционного типа (лекции)	Занятия семинарского типа			Всего		
			Семинары	Лабораторные занятия*	Практические занятия*			
<b>Плоские нелинейные акустические волны в идеальной и диссипативной средах</b>								
Простые (римановы) волны в акустике	5	2	1		3	2		
Волны с разрывами в профиле	5	2	1		3	2		
Волны конечной амплитуды в диссипативных средах.	5	2	1		3	2		
<b>Многомерные нелинейные волны и ограниченные волновые пучки</b>								
Сферически и цилиндрические волны конечной амплитуды	4	2	1		3	1		
Нелинейные акустические пучки.	5	2	1		3	2		

<sup>1</sup>Текущий контроль успеваемости может быть реализован в рамках занятий лекционного и(или) семинарского типа.

Параметрические антенны	4	2	1			3	1	
Нелинейная геометрическая акустика	5	2	1			3	2	<i>Контрольная работа</i>
<b>Нелинейные волны в структурно-неоднородных средах и средах с дисперсией</b>								
Нелинейные эффекты в структурно-неоднородных средах	3	1	1			2	1	
Акустические волны конечной амплитуды в средах со слабой дисперсией.	3	1	1			2	1	
<b>Гидродинамические эффекты, связанные с нелинейными волнам</b>								
Гидродинамические и акустические ударные волны	4	2	1			3	1	
Радиационное давление и акустические течения	4	2	1			3	1	
<b>Статистические явления в нелинейной акустике</b>	4	2	1			3	1	<i>Контрольная работа</i>
<b>Нелинейные динамические системы</b>	3	1	1			2	1	
<b>Основные типы и методы исследования нелинейных динамических систем</b>								
Неустойчивость и хаос в динамических системах	4	2	1			3	1	
Динамика сосредоточенных систем	3	1	1			2	1	
Нелинейные волновые процессы	4	2	1			3	1	
<b>Практические приложения нелинейной динамики и теории нелинейных волновых процессов</b>								
Современные проблемы нелинейной акустики.	5	2	1			3	2	
Проблемы газодинамики, аэроакустические взаимодействия	4	2	1			3	1	
Нелинейная гидрофизика; взаимодействие волн и течений в атмосфере и океане.	4	2	1			3	1	

Нелинейная сейсмика; нелинейные проблемы в физике Земли.	3	1	1			2	1	
Нелинейные процессы в биологических и химических системах.	3	1	1			2	1	
Техногенные и природные катастрофические процессы.	3	1	1			2	1	
Использование нелинейных явлений в науке, технике и технологиях.	3	1	1			2	1	
<b>Математические методы анализа нелинейных динамических систем</b>								
Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний.	4	2	1			3	1	
Аналитические методы решения нелинейных волновых задач.	5	2	2			4	1	
Метод непрерывных групп Ли и точно решаемые нелинейные задачи.	5	2	2			4	1	
Промежуточная аттестация_экзамен____	4						4 <sup>2</sup>	Экзамен
<b>Итого</b>	<b>108</b>	<b>72</b>					<b>36</b>	

\*Лабораторные занятия, практические занятия относятся к практической подготовке обучающихся.

<sup>2</sup>Часы на проведение промежуточной аттестации выделяются из часов самостоятельной работы обучающегося

## 6. Фонд оценочных средств для оценивания результатов обучения по дисциплине

6.1. Типовые задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения:

### Вопросы к зачету по дисциплине «Физика шумов и вибраций»:

1. Основные понятия теории волн: уравнения гидродинамики, бегущие волны, простые волны, волновые пучки, волновое уравнение, оператор Лапласа, числа Маха, Рейнольдса.
2. Основные методы упрощения и решения уравнений нелинейной акустики (метод последовательных приближений, метод медленно изменяющегося профиля, метод характеристик). Малый параметр в уравнениях акустики.
3. Уравнение простых волн, неявное решение, метод характеристик и его геометрическая интерпретация, общая картина эволюции волны в рамках УПВ.
4. 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).
5. 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.
6. Графический анализ искажений в профиле простой волны. Рассмотреть исходные синусоидальный, треугольный сигналы, N-волну и ударные волны разрежения и сжатия.
7. Спектр простой волны. Решение Бесселя-Фубини для исходного синусоидального сигнала. Спектр периодической и непериодической волн с произвольным начальным профилем.
8. Образование разрывов в простых волнах. Условия образования разрыва. Правило равенства площадей. Поведение ударного фронта в рамках УПВ и УБ.
9. Уравнение движения разрыва. Эволюция ударных волн сжатия и разрежения. Взаимодействие разрывов.
10. Образование разрыва в синусоидальной волне в идеальной среде. Профиль волны после образования разрыва, асимптотический пилообразный профиль.
11. Общая картина эволюции синусоидальной волны в нелинейной среде со слабым и сильным затуханием. Решения Хохлова и Фея.
12. Уравнение Навье-Стокса. Уравнение Бюргерса и его точное решение. Преобразование Хопфа-Коула. Автомодельные решения.
13. Решение Хохлова как асимптотическое решение уравнения Бюргерса при малой вязкости.
14. Особенности нелинейных сферических и цилиндрических волн. Условия образования разрыва.
15. Уравнение Хохлова-Заболотской. Нелинейные искажения в пучках. Параметрические антенны.
16. Стационарные решения уравнений нелинейной акустики (УПВ, УБ, КдВ)
17. Основные идеи приближения геометрической акустики. Уравнения эйконала и переноса. Изотропизация диаграммы направленности.
18. Особенности распространения волн в трубах и рупорах. Обобщенное уравнение Бюргерса.
19. Обобщенное уравнение Бюргерса. Сферические и цилиндрические волны, волны в трубах и рупорах, волны в приближении нелинейной геометрической акустики. Ширина ударного фронта.



20. Слабые ударные волны, ширина фронта (плоские, сферические и цилиндрические волны).
21. Структурная нелинейность жидкости с пузырьками.
22. Основные идеи методов нелинейной диагностики.
23. Понятие динамической системы. Ее основные характеристики.
24. Динамика нелинейных систем с сосредоточенными параметрами. Фазовый портрет. Особые точки, предельные циклы, аттракторы.
25. Консервативность, автономность нелинейных динамических систем.
26. Критерии устойчивости динамической системы. Неустойчивость и бифуркации.
27. Динамический хаос и переход к нему в динамической системе. Стохастическая динамика.
28. Фракталы. Фрактальная размерность аттрактора. Порог фрактальности.
29. Устойчивые волновые структуры в нелинейной акустике и гидродинамике. Ударные волны. Солитоны. Ячеистые многомерные структуры.
30. Нелинейные волновые процессы в возбудимых и активных средах.
31. Взаимодействие акустических волн и аэродинамических потоков. Генерация звука потоком.
32. Крупномасштабные нелинейные волновые процессы в Мировом океане. Взаимодействие волновых процессов в океане и атмосфере Земли.
33. Нелинейная гидроакустика. Нелинейные акустические поля в океане. параметрические антенны.
34. Особенности распространения различных акустических мод большой интенсивности в земной коре. Возможности восстановления внутренней структуры.
35. Нелинейные волновые процессы в природных средах - горных породах, пористых, гранулированных средах.
36. Нелинейная неразрушающая диагностика материалов и дефектоскопия.
37. Особенности нелинейных процессов в биологических и химических системах. Модели эволюции популяций типа "хищник-жертва".
38. Асимптотические методы решения уравнений нелинейных колебаний. Уравнение Ван-дер-Поля. Метод Крылова-Боголюбова, метод многих масштабов. Укороченные уравнения.
39. Аналитические методы решения нелинейных волновых уравнений. Вывод эволюционных уравнений.
40. Применение непрерывных групп Ли для построения точных решений нелинейных уравнений. Инвариантные решения и преобразования.

## 6.2. Шкала и критерии оценивания

## 7. Ресурсное обеспечение

Перечень основной и дополнительной учебной литературы

1. Руденко О.В., Гурбатов С.Н., Хедберг К.М. Нелинейная акустика в задачах и примерах. М.: Физматлит, 2007.
2. Руденко О.В., Солюян 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.
11. П.С.Ланда. Нелинейные колебания и волны. –М., Наука, Физматлит, 1997.
12. Н.В.Карлов, Н.А.Кириченко. Колебания, волны, структуры. –М., Наука, Физматлит, 1997.
13. Г.М. Заславский, Р.З. Сагдеев. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука, 1988.
14. М.И.Рабинович, Д.И.Трубецков. Основы теории колебаний и волн. - М.: Наука. 1987.
15. А.А.Андронов, А.А.Витт, С.Э.Хайкин. Теория колебаний. -М.: Наука, 16. 1981.
17. Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский. Асимптотические методы в
18. теории нелинейных колебаний. - М.: Наука, 1974.
19. Н.Н. Моисеев. Асимптотические методы нелинейной механики. - М.: Наука, 1981.
20. В.В.Мигулин, В.И.Медведев, Е.Р.Мустель, В.Н.Парыгин. Основы теории колебаний. - М.: Наука, 1988.
21. М.Б.Виноградова, О.В.Руденко, А.П.Сухоруков. Теория волн. - М.: Наука, 1990.
22. Н.Н.Ibragimov. Introduction to Modern Group Analysis. – Ufa: Tau, 2000.

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.
4. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.
5. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984.

Периодическая литература

1. Акустический журнал.
2. Journal of the Acoustical Society of America.

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

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

Описание материально-технической базы  
Учебная аудитория физического факультета.  
Проектор, компьютер

**8. Язык преподавания:** русский.