

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

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана физического факультета МГУ,
профессор, д.ф.-м.н.

/ В.В. Белокуров /

«_____» _____ 2023 г.

**Программа подготовки к экзамену кандидатского минимума по
специальности**

Акустика
(*Acoustics*)

Уровень высшего образования:

Аспирантура

Москва 2023

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с Приказом по МГУ от 24 ноября 2021 года № 1216 «Об утверждении Требований к основным программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, самостоятельно устанавливаемые Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова»

1. Краткая аннотация:

Курс посвящен изучению современного состояния акустики как области физики, включающей изучение упругих колебаний и волн, процессов их генерации, излучения и распространения в различных средах и структурах, рассеяния и дифракции, взаимодействия с веществом и волнами различной физической природы, а также анализ проблем передачи и обработки акустических сигналов, технической реализации и исследования соответствующих систем, устройств и приборов. Рассмотрены основные закономерности и основные уравнения как для акустических явлений, так и для близких по природе или свойствам явлений из смежных разделов физики – гидродинамики, физики колебаний и оптики.

Акустика

Цель изучения дисциплины – расширение и углубление знаний о современном состоянии и тенденциях развития в области акустики.

2. Уровень высшего образования - подготовка научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре.

3. Научная специальность: 1.3.7 – Акустика; область науки: естественные науки.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре Программы аспирантуры: дисциплина входит в образовательную компоненту Программы, является обязательной для изучения аспирантами и направлена на подготовку к сдаче кандидатского экзамена по научной специальности 1.3.7 – Акустика.

5. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 54 академических часа составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (52 часа занятия лекционного типа, 2 часа мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), 54 академических часа составляет самостоятельная работа учащегося.

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

Необходимы знания высшей математики и общей физики в объеме курсов, преподаваемых на физических специальностях классических университетов.

7. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них					Самостоятельная работа обучающегося, часы из них			
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка к коллоквиумам	Всего
Тема 1. Уравнения гидродинамики идеальной и вязкой теплопроводящей жидкости. Пределы применимости приближения сплошной среды, связь с кинетическим описанием. Акустическая, температурная и вихревая моды вязкой теплопроводящей среды. Адиабатическая и изотермическая скорости звука. Коэффициент поглощения звука в среде с малыми вязкостью и теплопроводностью. Сжимаемая и несжимаемая жидкость. Потенциальные и вихревые течения идеальной жидкости. Интегралы Бернулли и Коши-Лагранжа. Теорема Томпсона о циркуляции скорости жидкости.	7	3					3	2	2	4
Тема 2. Гравитационно-капиллярные волны на	7	4					4	2	1	3

поверхности жидкости. Внутренние гравитационные волны в стратифицированной жидкости; частота Брента-Вяйсяля. Течения вязкой жидкости (Пуазейля, Куэтта). Затопленная струя. Пограничный слой, уравнения Прандтля. Ударные волны. Изменение параметров среды при переходе через ударный фронт. Ширина ударного фронта. Скорость распространения ударных волн по невозмущенной среде. Гидродинамические неустойчивости. Число Рейнольдса. Переход к турбулентности. Развитая турбулентность. Фракталы, число Фейгенбаума. Гидродинамика сверхтекучей жидкости. Второй звук.										
Тема 3. Подходы Эйлера и Лагранжа к описанию сплошной среды, основания для использования различных подходов в гидродинамике и теории упругости. Уравнения теории упругости. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел. Линеаризация уравнений для малых возмущений. Продольные и сдвиговые волны в изотропном теле. Волны в твердых средах в присутствии границ (Рэлея, Лэмба, Лява, клиновые волны). Упругие волны в кристаллах. Волны в пьезо- и сегнетоэлектриках, магнетиках.	8	4					4	2	2	4
Тема 4. Линейные и нелинейные колебательные системы с одной степенью свободы. Явление резонанса. Импульсная переходная и частотная передаточная характеристики линейной системы. Резонатор Гельмгольца. Сферически-симметричные колебания газового пузырька в жидкости, уравнение Рэлея.	8	4					4	2	2	4

Колебательные системы с двумя и многими степенями свободы. Нормальные колебания. Вынужденные колебания, теорема взаимности.										
Тема 5. Колебания периодических цепочек (точечные массы с упругим взаимодействием ближайших соседей). Акустическая и оптическая моды. Собственные и вынужденные колебания распределенных систем конечных размеров. Разложение вынужденных колебаний по собственным функциям системы (модам).	7	3					3	2	2	4
Тема 6. Волновое уравнение для акустических волн. Его вывод из уравнений гидродинамики и теории упругости. Плоские однородные и неоднородные волны. Плотность и поток энергии в акустической волне. Плоские, сферические и цилиндрические волны. Пространственно-временной спектр Фурье волнового поля. Представление произвольного волнового поля в виде суммы гармонических плоских волн, распространяющихся в разных направлениях. Отражение и преломление акустических волн на плоской границе раздела двух сред. Закон Снеллиуса. Формулы Френеля. Поле в среде при падении под углом, большем критического. Плотность и поток энергии. Акустический импеданс. Отражение от импедансной границы.	8	4					4	2	2	4
Тема 7. Распространение волнового пакета в диспергирующей среде. Фазовая и групповая скорости. Физические причины появления зависимости скорости	8	4					4	2	2	4

<p>звукa от частоты. Теория дисперсии Мандельштама-Леонтовича. Принцип Гюйгенса-Френеля. Интеграл Кирхгофа-Гельмгольца. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Дифракция на круглом и прямоугольном отверстии (экране), принцип Бабинe. Излучение звука пульсирующей сферой и поступательно колеблющейся сферой. Монопольное и дипольное излучение, сопротивление излучению и присоединенная масса. Поршневой излучатель в плоском жёстком экране. Ближнее и дальнее поле излучателя. Диаграмма направленности. Волны в средах с крупномасштабными неоднородностями. Приближение геометрической акустики. Уравнения эйконала и переноса. Дифференциальное уравнение луча. Лучи в слоисто-неоднородных средах. Ход лучей в подводном звуковом канале.</p>										
<p>Тема 8. Скорость распространения и механизмы затухания акустических волн в газах, жидкостях, твердых телах, полимерах и биотканях. Способы возбуждения и приема акустических волн в различных средах и частотных диапазонах. Электроакустические преобразователи: электродинамические, пьезоэлектрические, магнитострикционные. Электромеханические аналогии.</p>	7	3				3	2	2		4
<p>Тема 9. Методы измерения характеристик акустических полей: колебательной скорости, акустического давления, скорости распространения, коэффициента поглощения и затухания, интенсивности. Волны в узких</p>	8	4				4	2	2		4

трубах переменного сечения, уравнение Вебстера. Акустические волноводы (плоский слой, волноводы с прямоугольным и круглым сечением). Нормальные волны. Закон дисперсии.										
Тема 10. Дифракция звука на телах канонической формы (сфера, цилиндр). Рассеяние звука на малых препятствиях, пузырьках газа в жидкостях и неровностях границ. Дифракция света на ультразвуке. Акустооптика. Возбуждение акустических волн при поглощении света. Оптоакустика.	8	4					4	2	2	4
Тема 11. Распространение звука в движущейся среде. Движущиеся источники. Эффект Доплера. Излучение акустических волн при движении тел со сверхзвуковой скоростью. Переходное излучение. Флуктуации амплитуды, фазы и угла прихода луча при распространении звука в случайно-неоднородной среде. Аэродинамическая генерация звука. Уравнение Лайтхилла.	8	4					4	2	2	4
Тема 12. Акустическое радиационное давление. Акустические течения. Римановы (простые) волны. Акустическое число Маха. Искажение профиля плоской бегущей волны, генерация гармоник. Нелинейные взаимодействия в плоских волнах и пучках. Пилообразные волны. Нелинейное затухание и эффект насыщения. Учет вязкости при описании нелинейных акустических волн. Уравнение Бюргерса. Акустическое число Рейнольдса. Ширина ударного фронта.	7	3					3	2	2	4

<p>Тема 13. Излучающие и приемные электроакустические преобразователи. Метод электромеханических аналогий. Активные материалы для пьезоэлектрических и магнитострикционных преобразователей. Коэффициент электромеханической связи. Частотные характеристики электроакустических преобразователей, коэффициент нелинейных искажений. Коэффициент полезного действия излучателей и помехоустойчивость приемников. Преобразователи для воздушной среды. Диффузорные и рупорные громкоговорители. Микрофоны – приемники звукового давления и градиента давления. Газодинамические источники звука, свистки, сирены. Гидроакустические излучатели и гидрофоны (приемники акустического давления и градиента давления). Гидроакустические антенны. Характеристики направленности. Методы электронного формирования характеристик направленности антенных решеток и управления ими. Профиль скорости звука и структура звукового поля в океане. Подводный звуковой канал. Приповерхностный канал. Особенности распространения звука в мелком море. Пассивная гидролокация. Шумы океана и корабля. Выделение сигнала из помех. Оптимальная фильтрация. Уравнение дальности, методы и точность пеленгования. Активная гидролокация. Отражение звука корпусом и кильватерным следом корабля. Виды зондирующих сигналов, их оптимальная обработка в присутствии шумовой и реверберационной помех. Параметрические излучающие и приемные антенны. Характеристики направленности. Методы гидроакустической связи,</p>	8	4					4	2	2	4
--	---	---	--	--	--	--	---	---	---	---

навигации, рыболокации, съемки рельефа дна, определения глубины места и абсолютной скорости движения.										
<p>Тема 14. Механические, аэродинамические и гидродинамические источники шумов. Транспортные шумы. Звукопоглощение и звукоизоляция. Звукопоглощающие материалы и конструкции для воздушной среды. Пористые материалы, резонансные поглотители. Активные методы подавления шума. Статистическая и волновая теория акустики помещений. Оптимальное время реверберации. Акустика больших помещений (неравномерность поля, искажения нестационарных сигналов, явление эхо) и методы ее улучшения. Музыкальные строи (пифагоров, равномерно темперированный). Основные акустические характеристики музыкальных звуков (тембр, атака, обертоны, форманты, шумовые призвуки). Классификация музыкальных инструментов по физическому механизму звукообразования. Методы акустических измерений и калибровки преобразователей. Специальные помещения и установки для измерений в воздухе и в воде. Заглушенная камера, заглушенный гидробассейн. Ультразвуковые технологии (осаждение аэрозолей, очистка поверхностей, дегазация жидкостей, эмульгирование, обработка материалов, сварка). Ультразвуковая медицинская диагностика. А-, В-, М-режимы ультразвуковой визуализации. Доплеровский режим для измерения скорости кровотока. Интенсивный</p>	7	4					4	2	1	3

<p>ультразвук в терапии и хирургии. Механизмы воздействия ультразвука на ткань. Ударноволновая литотрипсия. Ультразвуковые методы измерений и неразрушающего контроля. Дефектоскопия промышленных изделий, строительных материалов и конструкций. Взаимодействие волн пространственного заряда с акустическим полем; акустоэлектрический эффект. Принципы работы акустоэлектронных устройств (усилители ультразвука, линии задержки, фильтры, конвольверы, запоминающие устройства). Возбуждение и прием поверхностных акустических волн (ПАВ), устройства обработки сигналов на ПАВ. Взаимодействия света со звуком. Дифракция Брэгга и Рамана-Ната. Принципы работы устройств акустооптики (модуляторы и дефлекторы света, преобразователи свет-сигнал, акустооптические фильтры), анализаторы спектра и корреляторы.</p>									
<p>Промежуточная аттестация: допуск к кандидатскому экзамену</p>	2					2			
Итого	108	52				2	54		54

8. Образовательные технологии.

Используемые формы и методы обучения: лекции и семинарские занятия, самостоятельная работа студентов.

В процессе преподавания дисциплины преподаватель использует как классические формы и методы обучения (лекции и семинарские занятия), так и активные методы обучения.

При проведении лекционных занятий преподаватель использует при необходимости аудиовизуальные, компьютерные и мультимедийные средства обучения, а также демонстрационные и наглядно-иллюстрационные (в том числе раздаточные) материалы.

Семинарские занятия по данной дисциплине проводятся с привлечением необходимых Интернет-ресурсов и пакетов прикладных программ.

9. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю):

Перед началом изучения дисциплины преподаватель должен ознакомить студентов с видами контактной и самостоятельной работы, перечнем литературы и интернет-ресурсов, формами текущей и промежуточной аттестации, с критериями оценки качества знаний для итоговой оценки по дисциплине

10. Ресурсное обеспечение:

Перечень основной и вспомогательной учебной литературы ко всему курсу.

Основная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Гидродинамика*. М.: Наука, 1986; *Теория упругости*. М.: Наука, 1987.
2. Бреховских Л.М., Гончаров В.В. *Введение в механику сплошных сред*. М.: Наука, 1982.
3. Горелик Г.С. *Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику*. М., Л.: Гостехтеориздат, 1950.
4. Мигулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. *Основы теории колебаний*. М.: Наука, 1988.
5. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. *Теория волн*. М.: URSS, 2019.
6. Исакович М.А. *Общая акустика*. М.: Наука, 1973.
7. Скучик Е. *Основы акустики*. Тома 1 и 2. М: Мир, 1976.
8. Красильников В.А., Крылов В.В. *Введение в физическую акустику*. М.: Наука, 1984.
9. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. *Теоретические основы акустики океана*. М.: Наука, 2007.
10. Хаясака Т. *Электроакустика*. М.: Мир, 1982.
11. *Акустика в задачах* / Под ред. С.Н. Гурбатова и О.В. Руденко. М.: Наука, 1996.
12. Урик Р.Дж. *Основы гидроакустики*. Л.: Судостроение, 1980.
13. *Ультразвук: Маленькая энциклопедия* / Под ред. И.П. Голяминой. М.: Сов. энциклопедия, 1979.
14. Вахитов Ш.Я., Ковалгин Ю.А., Фадеев А.А., Щевьев Ю.П. *Акустика* / под ред. Ю.А.Ковалгина. М.: Горячая линия - Телеком, 2016.
15. Алдошина И.А., Приттс Р. *Музыкальная акустика*. СПб.: Композитор, 2014.

Дополнительная литература:

1. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1981.
2. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981.
3. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975.
4. Лепендин Л.Ф. Акустика. М.: Высшая школа, 1978.
5. Кайно Г. Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. М.: Мир, 1990.
6. Клещев А.А., Клюкин И.И. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1987.
7. Михайлов И.Г., Соловьев В.А., Сырников Ю.П. Основы молекулярной акустики. М.: Наука, 1964.
8. Балакиши В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
9. Справочник по технической акустике. Л.: Судостроение, 1980.
10. Щевьев Ю.П. Основы физической акустики. СПб.: Лань, 2017.
11. Ультразвук в медицине: физические основы применения / Под ред. К. Хилла, Дж. Бэмбера и Г. тер Хаар (пер. с англ). М.: Мир, 1989.
12. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: ИЛ, 1957.
13. Физика и техника мощного ультразвука / Под ред Л.Д. Розенберга: Книга 1. Источники мощного ультразвука. М.: Наука, 1967. Книга 2. Мощные ультразвуковые поля. М.: Наука, 1968. Книга 3. Физические основы ультразвуковой технологии. М.: Наука, 1970.
14. Бергман Л. Ультразвук. – М.: ИЛ, 1956.

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости):

1. Сайт журнала «Акустический журнал» <http://www.akzh.ru/>
2. Сайт журнала «Техническая акустика» <http://www.ejta.org/ru>

Перечень используемых информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса, включая программное обеспечение, информационные справочные системы (при необходимости):

Информационная система «АКУСТИКА» <http://akdata.ru/>

Описание материально-технической базы:

Занятия проводятся в учебной аудитории, оснащенной необходимым учебным оборудованием для проведения лекционных и семинарских занятий.

11. **Язык преподавания** – русский

12. **Преподаватель:**

Д.ф.-м.н., профессор Сапожников Олег Анатольевич

E-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru

Тел.: +7-495-939-2952

Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения

Образцы домашних заданий:

1. Проведя линеаризацию уравнения Рэлея, выпишите формулу для резонансной частоты сферически-симметричных колебаний газового пузырька в жидкости.
2. Получите направление распространения акустических волн, излучаемых при движении тел со сверхзвуковой скоростью.
3. Напишите уравнения для связи доплеровского сдвига со скоростями источника и приёмника.
4. Указать направление распространения дифрагированного светового луча при дифракция света на ультразвуке.
5. Решите задачу:
На входе в нелинейную среду задана плоская гармоническая акустическая волна с заданной амплитудой акустического давления. Используя уравнение простых волн, найти расстояние образования разрыва.
6. Построить приближенные зависимости скорости фазовой скорости от частоты для акустической и оптической мод в 2-атомной цепочке.
7. Выпишите формулу для угла дифракционной расходимости и рассчитайте этот угол при излучении звука заданной длины волны источником заданного диаметра.
8. Исходя из уравнения Бюргерса, выведите формулу для ширины ударного фронта в пилообразной волне заданной амплитуды.
9. Выведите закон дисперсии для акустических волн в релаксирующей среде, используя подход Мандельштама-Леонтовича.
10. Получите решение уравнения Гельмгольца методом углового спектра.

Вопросы для промежуточной аттестации – зачета:

1. Выписать уравнения гидродинамики идеальной и вязкой теплопроводящей жидкости.
2. Выражение для коэффициента затухания звука в среде с малыми вязкостью и теплопроводностью.
3. Выписать интегралы Бернулли и Коши-Лагранжа.
4. Выписать закон дисперсии для гравитационно-капиллярные волны на поверхности жидкости.
5. Что такое ударные волны? Скорость распространения ударных волн по невозмущенной среде.
6. Чем отличаются подходы Эйлера и Лагранжа к описанию сплошной среды? Основания для использования различных подходов в гидродинамике и теории упругости.
7. Выписать уравнения теории упругости для изотропных тел. Показать, что из них следуют волновые уравнения для продольных и сдвиговых волн.
8. Свойства волн в твердых средах в присутствии границ (Рэлея, Лэмба, Лява, клиновые волны).
9. Импульсная переходная и частотная передаточная характеристики линейной системы.
10. Каковы закономерности поведения колебательных систем с двумя и многими степенями свободы? Нормальные колебания.
11. Написать уравнения для колебания периодических цепочек (точечные массы с упругим взаимодействием ближайших соседей). Что такое акустическая и оптическая моды?
12. Вывести волновое уравнение для акустических волн из уравнений гидродинамики и теории упругости.
15. Каковы закономерности отражения и преломления акустических волн на плоской границе раздела двух сред? Закон Снеллиуса. Формулы Френеля. Поле в среде при падении под углом, большем критического. Плотность и поток энергии. Акустический импеданс. Отражение от импедансной границы.

17. Что такое волновой пакет? Закономерности распространения волнового пакета в диспергирующей среде. Фазовая и групповая скорости. Физические причины появления зависимости скорости звука от частоты.
18. Сформулировать принцип Гюйгенса-Френеля. Особенности дифракции волн на круглом и прямоугольном отверстии (экране).
19. Выписать выражение для акустического давления в звуковой волне, излучаемой пульсирующей и колеблющейся сферами.
20. Что такое приближение геометрической акустики? Выписать уравнения эйконала, переноса и дифференциальное уравнение луча.
21. Физические принципы работы электродинамических, пьезоэлектрических и магнестрикционных излучателей звука.
22. Методы измерения характеристик акустических полей: колебательной скорости, акустического давления, скорости распространения, поглощения, интенсивности.
23. Выписать уравнение Вебстера.
24. Закономерности сдвига частоты при движении источников звука. Формула для эффекта Доплера.
25. За счёт чего происходит аэродинамическая генерация звука? Уравнение Лайтхилла.
26. Что такое радиационное давление и акустические течения? Каковы физические причины их возникновения?
27. Что такое риманова (простая) волна? Искажение профиля бегущей плоской волны, генерация гармоник.
28. Выписать уравнение Бюргерса. Какой физический процесс оно описывает?

Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения

Зачет проходит по билетам, включающем 30 вопросов. Уровень знаний аспиранта по каждому вопросу на «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». В случае, если на все вопросы был дан ответ, оцененный не ниже, чем «удовлетворительно», аспирант получает общую оценку «зачтено».

Шкала оценивания знаний, умений и навыков

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний основных законов акустики	В целом успешные, но не систематические знания основных законов акустики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных законов акустики	Успешные и систематические знания основных законов акустики
Умения	Отсутствие умения применять знания основных законов акустики для решения научных задач	В целом успешное, но не систематическое применять знания основных законов	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение	Успешное и систематическое умение применять знания

		акустики для решения научных задач	применять знания основных законов акустики для решения научных задач	основных законов акустики для решения научных задач
Навыки	Отсутствие/фрагментарное владение навыками решения научных задач в области акустики	В целом успешное, но не систематическое владение навыками решения научных задач в области акустики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками решения научных задач в области акустики	Успешное и систематическое владение навыками решения научных задач в области акустики