

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»  
(ИОФ РАН)

УТВЕРЖДАЮ



Директор ИОФ РАН,  
мл.-корр. РАН

С.В. Гарнов

\_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Рабочая программа дисциплины  
АКУСТИКА

Специальность: 1.3.7. Акустика

г. Москва

2022 год

Рабочая программа дисциплины «Акустика» составлена в соответствии с Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов, утвержденными приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 20 октября 2021 г. № 951.

Программу составили:

М.Л. Лямшев, ВРИО директора НЦВИ, к.ф.-м.н.

Г.А. Ляхов, заместитель директора НЦВИ, д.ф.-м.н.

В.Г. Петников, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.

В.Л. Преображенский, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.

Программа обсуждена и одобрена на заседании аспирантской комиссией ИОФ РАН  
30.06.2022, протокол №2206-30

Программа утверждена решением Ученого совета ИОФ РАН 05.07.2022 протокол №13

### **Аннотация**

Учебная дисциплина «Акустика» является важной составной частью Учебного плана программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ИОФ РАН. В рамках дисциплины «Акустика» обучающиеся далее – аспиранты) получают базовые знания по следующим основным направлениям:

- 1) Нелинейные акустические явления, обусловленные наличием в среде характерных масштабов внутренней микроструктуры, которые демонстрируют необычные нелинейные свойства и благодаря этому исключительно перспективны с точки зрения разнообразных приложений в области акустической диагностики, неразрушающего контроля и модификации различных материалов;
- 2) Когерентная акустика сложных искусственных и природных сред, характеризующихся наличием регулярных и (или) случайных неоднородностей различных пространственных и временных масштабов. Здесь имеется в виду водная среда и земные породы, где низкочастотные звуковые волны являются единственно возможным типом волн, способных распространяться на значительные расстояния, а также интеллектуальные конструкционные материалы.

Дисциплина «Акустика» является важным фактором формирования у аспиранта целостного научного мировоззрения, развития физического мышления, умения использовать базовые физические законы, для анализа различных явлений в искусственных и природных средах. Освоение дисциплины позволит выработать у аспирантов практические подходы к решению современных проблем в области акустики и смежных областях естественных наук. Дисциплина «Акустика» также направлена на подготовку аспирантов к сдаче кандидатского экзамена по специальности 1.3.7. «Акустика».

Общая трудоемкость учебной дисциплины «Акустика» составляет 5 зачетных единиц (180 часов).

Контроль уровня освоения дисциплины аспирантами проводится в формах текущей и итоговой аттестации. Текущая аттестация предполагает оценку знаний и умений на лекционных занятиях с помощью устных опросов, оценки различных видов самостоятельной работы аспирантов. Промежуточная аттестация аспирантов проводится в форме зачетов (в 3, 4 и 5 семестрах). Итоговая аттестация проводится в рамках кандидатского экзамена по специальности «Акустика» (6 семестр).

### **1. Цель изучения дисциплины**

Цель изучения дисциплины состоит в освоении обучающимися (фундаментальных) знаний в области акустики, овладении методами и выработке практических навыков решения задач по акустике, формировании умений, необходимых для успешного осуществления научно-исследовательской деятельности в области акустики

### **2. Задачи дисциплины**

1) освоение аспирантами базовых знаний в области акустики как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей научно-технические основы современных инновационных сфер деятельности;

2) обучение аспирантов основным принципам решения задач в области акустики и освоение основных теоретических методов, применимых к описанию явлений в этой области физики;

3) формирование правильных теоретических подходов к выполнению научных исследований в области акустики.

### 3. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры

Дисциплина «Акустика» относится к элективным дисциплинам Образовательного компонента «Дисциплины (модули)» программы аспирантуры по специальности 1.3.7. «Акустика».

Дисциплина «Акустика» реализуется в соответствии с ФГТ, ОПОП ВО и Учебного плана аспирантуры ИОФ РАН по специальности 1.3.7. «Акустика»

Изучение дисциплины «Акустика» опирается на знания базовых разделов математического анализа, дифференциальных уравнений, общей физики, а также начальных знаний по теоретической физике, приобретенных аспирантами в рамках освоения программ магистратуры или специалитета по естественнонаучным и техническим специальностям.

### 4. Требования к результатам освоения дисциплины

Изучение дисциплины «Акустика» направлено на формирование у аспирантов следующих когнитивных умений и навыков:

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач в области акустики, а также в смежных и междисциплинарных областях;
- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области акустики.

В результате изучения дисциплины аспирант должен:

**Знать** место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях; естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности в следующих областях:

- современные проблемы физики и математики;
- взаимосвязи и фундаментальное единство естественных наук;
- основные законы, явления и эффекты в акустике;
- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в акустике и ее приложениях;
- новейшие открытия естествознания в области акустики;
- постановку проблем моделирования физических процессов, протекающих в естественных и природных средах;
- основные разделы гидродинамики, теории упругости, теории колебаний, теории волн
- основные физические свойства искусственных и природных сред, включая Мировой океан и земные породы.

**Уметь:**

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы, а также фундаментальные знания для понимания сущностных явлений окружающего мира;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- решать практические задачи по экспериментальным и теоретическим исследованиям в области акустики;
- обосновывать применение математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к акустике;
- работать с информацией в области акустики, полученной из различных источников: научной периодической литературы, монографий и учебников, электронных ресурсов сети Интернет;

- активно и целенаправленно применять полученные знания, навыки и умения для выбора тематики выполнения индивидуальной научно-исследовательской работы, планирования оптимального проведения эксперимента в области акустики
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций в акустики;
- выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности при анализе возможностей дистанционной диагностики искусственных и природных сред;
- привлекать для решения освоенный физико-математический аппарат гидродинамики, теории упругости, теории колебаний и теории волн;
- применять на практике умения и навыки в организации исследовательских работ и проводить научные исследования, готовность к участию в инновационной деятельности.

**Владеть:**

- планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента в области акустики;
- математическим моделированием физических задач возникающих при исследованиях распространения и рассеяния звука;
- научной картиной мира в области акустики и смежных областях;
- творческим подходом в реализации научно-технических задач, основанному на систематическом обновлении полученных знаний, навыков и умений и использовании последних достижений в области акустики.

## 5. Объем и вид учебной работы

Общая трудоёмкость дисциплины «Акустика» составляет 5 зач. ед. (180 часов), их распределение по видам работ представлено в таблице 1.

Таблица 1

**Распределение трудоёмкости дисциплины по видам работ**

Вид учебной работы	Трудоёмкость					
	зач. ед.	час.	в т.ч. по семестрам			
			3	4	5	6
<b>Общая трудоёмкость</b> дисциплины по учебному плану	<b>5</b>	<b>180</b>	<b>54</b>	<b>54</b>	<b>36</b>	<b>36</b>
<b>Аудиторная работа:</b>	<b>2</b>	<b>72</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	-	-
лекции (Л)		72	36	36	-	-
семинары (С)		-	-	-	-	-
<b>Самостоятельная работа:</b>	<b>3</b>	<b>128</b>	<b>26</b>	<b>30</b>	<b>36</b>	<b>36</b>
самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала, освоение материала учебников и учебных пособий, подготовка к семинарам и т.д.)		80	22	26	32	-
Подготовка к зачёту		12	4	4	4	-
Подготовка к экзамену		36	-	-	-	36
<b>Вид контроля</b> (З – зачет, Э – кандидатский экзамен)			<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>Э</b>

## 6. Содержание дисциплины

Таблица 2

## Тематический план учебной дисциплины

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего	Аудиторная работа		Внеаудиторная работа СР
		Л	С	
Раздел 1. Теоретические основы акустики и смежных наук				
Тема 1.1. Гидродинамика	12	8	0	6
Тема 1.2. Теория упругости	12	6	0	6
Тема 1.3. Теория колебаний	15	6	0	7
Тема 1.4. Теория волн	15	8	0	7
<b>Всего за 3 семестр</b>	<b>54</b>	<b>28</b>	<b>0</b>	<b>26</b>
Раздел 2. Акустические волны (возбуждение, распространение, регистрация). Применение акустических волн				
Тема 2.1. Акустические волны в средах с неоднородностями	10	4	0	6
Тема 2.2. Акустика океана	12	6	0	6
Тема 2.3. Физическая акустика	10	4	0	6
Тема 2.4. Техническая акустика.	12	6	0	6
Тема 2.5. Технические средства для экспериментальных исследований. Обработка результатов в акустических экспериментах.	10	4	0	6
<b>Всего за 4 семестр</b>	<b>54</b>	<b>24</b>	<b>0</b>	<b>30</b>
Раздел 3. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины	36	0	0	36
<b>Всего за 5 семестр</b>	<b>36</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>36</b>
Раздел 4. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины по программе кандидатского экзамена по специальности	36	0	0	36
<b>Всего за 6 семестр</b>	<b>36</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>36</b>
<b>Итого по дисциплине</b>	<b>180</b>	<b>54</b>	<b>0</b>	<b>128</b>

Раздел 1. Теоретические основы акустики и смежных наук<sup>1</sup>

## Тема 1.1. Гидродинамика

1. Уравнения гидродинамики идеальной и вязкой теплопроводящей жидкости. Пределы применимости приближения сплошной среды, связь с кинетическим описанием.
2. \*Акустическая, температурная и вихревая моды теплопроводящей среды. Адиабатическая и изотермическая скорости звука. Коэффициент затухания звука в среде с малыми вязкостью и теплопроводностью.
3. \*Сжимаемая и несжимаемая жидкость. Потенциальные и вихревые течения идеальной жидкости. Интегралы Бернулли и Коши-Лагранжа. Теорема Томпсона о циркуляции скорости жидкости.

<sup>1</sup> Содержание тем, отмеченных звездочкой относится к самостоятельному обучению.

4. Гравитационно-капиллярные волны на поверхности жидкости. Внутренние гравитационные волны в стратифицированной жидкости; частота Брента-Вяйсяля.
5. \*Течения вязкой жидкости (Пуазейля, Куэтта). Затопленная струя. Пограничный слой, уравнения Прандтля.
6. \*Ударные волны. Изменение параметров среды при переходе через разрыв. Ширина ударного фронта. Скорость распространения ударных волн по невозмущенной среде.
7. Гидродинамические неустойчивости. Число Рейнольдса. Переход к турбулентности. Развитая турбулентность. Фракталы, число Фейгенбаума
8. Распространение звука в движущейся среде. Движущиеся источники. Эффект Доплера. Излучение при сверхзвуковом движении, переходное излучение.
9. Радиационное давление и акустические течения

### **Тема 1.2. Теория упругости**

1. \*Подходы Эйлера и Лагранжа к описанию сплошной среды, основания для использования различных подходов в гидродинамике и теории упругости.
2. Уравнения теории упругости. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел. Линеаризация уравнений для малых возмущений. Продольные и сдвиговые волны в изотропном теле.
3. \*Волны в твердых средах в присутствии границ (волны Рэлея, Лэмба, Лява, клиновые волны).
4. Упругие волны в кристаллах. Волны в пьезо- и сегнетоэлектриках.

### **Тема 1.3. Теория колебаний**

1. 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.
2. Колебательные системы с двумя и многими степенями свободы. Нормальные колебания. Вынужденные колебания, теорема взаимности.
3. \*Колебания периодических цепочек (точечные массы с упругим взаимодействием ближайших соседей). Акустическая и оптическая моды.
4. \*Собственные и вынужденные колебания распределенных систем конечных размеров. Разложение вынужденных колебаний по собственным функциям системы (модам).

### **Тема 1.4. Теория волн**

1. Волновое уравнение (вывод из уравнений гидродинамики и теории упругости). Плоские однородные и неоднородные волны. Плотность и поток энергии.
2. Сферические и цилиндрические волны. Пространственно-временной спектр Фурье волнового поля; его представление в виде суммы гармонических плоских волн.
3. Распространение волнового пакета в диспергирующей среде. Фазовая и групповая скорости. Теория дисперсии Мандельштама-Леонтовича. Физические причины появления зависимости скорости звука от частоты.
4. \*Римановы (простые) волны. Акустическое число Маха. Искажение профилей бегущих волн, генерация гармоник. Взаимодействие плоских волн и пучков.
5. \*Пилообразные волны. Нелинейное затухание и эффект насыщения. Учет вязкости. Уравнение Бюргерса. Акустическое число Рейнольдса.
6. \*Излучение звука пульсирующей сферой и колеблющейся сферой. Монопольное и дипольное излучение, сопротивление излучению и присоединенная масса.

Поршневой излучатель в плоском экране. Ближнее и дальнее поле. Характеристика направленности.

## **Раздел 2. Акустические волны (возбуждение, распространение, регистрация). Применение акустических волн<sup>2</sup>.**

### **Тема 2.1. Акустические волны в средах с неоднородностями.**

1. 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.
2. Принцип Гюйгенса-Френеля. Формулы Грина и Кирхгофа. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Дифракция на круглом и прямоугольном отверстии (экране), принцип Бабине.
3. Рассеяние звука на малых препятствиях, пузырьках газа в жидкостях и неровностях границ.
4. \*Дифракция звука на телах канонической формы (сфера, цилиндр). Дифракция света на ультразвуке
5. \*Приближение геометрической акустики. Уравнения эйконала, переноса, дифференциальное уравнение луча.
6. \*Волны в узких трубах переменного сечения, уравнение Вебстера. Акустические волноводы. Волноводы с прямоугольным и круглым сечением.

### **Тема 2.2. Акустика океана**

1. Акустический волновод в глубоком океане (подводный звуковой канал) и в мелком море (плоскостной придонный и приповерхностный волновод). Типичные профили скорости звука в указанных волноводах и их пространственная и временная изменчивость. Характеристики морской поверхности и морского дна.
2. Методы описания звукового поля в волноводе океанического типа и их сравнительный анализ. Звуковые лучи, волноводные моды и их взаимодействие, метод параболического уравнения
3. \*Рефракция звука в океане. Физические причины, вызывающие рефракцию, и её проявления в глубоком океане и мелком море.
4. \*Реверберация в волноводе океанического типа.
5. \*Интерференционный инвариант. Дислокации звукового поля.
6. Акустические шумы в океане.

### **Тема 2.3. Физическая акустика**

1. \*Скорость распространения и механизмы затухания акустических волн в газах, жидкостях, твердых телах, полимерах и биотканях.
2. Акустические аномалии в области фазовых переходов в сегнетоэлектриках и сегнетоэластиках.
3. \*Взаимодействие упругих и спиновых волн в магнетиках, магнитоакустический резонанс.
4. Связанные магнитоупругие волны вблизи спиновой переориентации. Гигантская акустическая нелинейность магнетиков.
5. Параметрическое обращение волнового фронта (ОВФ) ультразвука. ОВФ-акустоскопия. Магнитоакустические устройства обработки сигналов, сенсоры магнитных и механических величин.

<sup>2</sup> Содержание тем, отмеченных звездочкой относится к самостоятельному обучению.



## **Тема 2.4. Техническая акустика**

1. \*Пассивная и активная гидролокация. Уравнение гидролокации.
2. \*Методы гидроакустической связи, навигации, рыболокации, съемки рельефа дна, определения глубины места и абсолютной скорости движения.
3. \*Методы акустических измерений и калибровки преобразователей. Специальные помещения и установки для измерений в воздухе и в воде. Заглушенная камера, заглушенный гидробассейн.
4. Механические, аэродинамические и гидродинамические источники шумов. Аэродинамическая генерация звука. Уравнение Лайтхилла.
5. \*Звукопоглощение и звукоизоляция. Звукопоглощающие материалы и конструкции для воздушной среды. Пористые материалы, резонансные поглотители. Активные методы подавления шума.
6. Ультразвуковая медицинская диагностика. Интенсивный ультразвук в терапии и хирургии.
7. Оптоакустика. Лазерная искровая спектроскопия.
8. Термооптическое возбуждение акустических волн. Передаточные функции термооптического возбуждения ультразвука и профили возбуждаемых акустических импульсов.
9. \*Ультразвуковые методы измерений и неразрушающего контроля. Дефектоскопия промышленных изделий, строительных материалов и конструкций.
10. \*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.
11. 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).

## **Тема 2.5. Технические средства для экспериментальных исследований. Обработка результатов в акустических экспериментах**

1. \*Излучающие и приемные электроакустические преобразователи. Метод электромеханических аналогий. Активные материалы для пьезоэлектрических и магнитострикционных преобразователей. Коэффициент электромеханической связи. Частотные характеристики, коэффициент нелинейных искажений. Коэффициент полезного действия излучателей и помехоустойчивость приемников.
2. Методы измерения характеристик акустических полей: колебательной скорости, акустического давления, скорости распространения, поглощения, интенсивности.
3. Гидродинамические излучатели и гидрофоны (приемники акустического давления и градиента давления). Гидроакустические антенны. Характеристики направленности. Методы электронного формирования характеристик направленности антенных решеток и управления ими.
4. \*Параметрические излучающие и приемные антенны. Характеристики направленности.

5. Статистическая обработка результатов экспериментов. Спектральный и корреляционный анализ. Ошибки измерений.

### **Раздел 3. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины**

Разделы, рекомендуемые для самостоятельного изучения:

(приводятся разделы, возможен перенос специальных вопросов из основной программы или программы кандидатского экзамена)

#### **Тема 1.1. Гидродинамика**

1. Акустическая, температурная и вихревая моды теплопроводящей среды. Адиабатическая и изотермическая скорости звука. Коэффициент затухания звука в среде с малыми вязкостью и теплопроводностью.

2. Сжимаемая и несжимаемая жидкость. Потенциальные и вихревые течения идеальной жидкости. Интегралы Бернулли и Коши-Лагранжа. Теорема Томпсона о циркуляции скорости жидкости

3. Течения вязкой жидкости (Пуазейля, Куэтта). Затопленная струя. Пограничный слой, уравнения Прандтля.

4. Ударные волны. Изменение параметров среды при переходе через разрыв. Ширина ударного фронта. Скорость распространения ударных волн по невозмущенной среде

#### **Тема 1.2. Теория упругости**

1. Подходы Эйлера и Лагранжа к описанию сплошной среды, основания для использования различных подходов в гидродинамике и теории упругости

2. Волны в твердых средах в присутствии границ (Рэлея, Лэмба, Лява, клиновые волны).

#### **Тема 1.3. Теория колебаний**

1. Колебания периодических цепочек (точечные массы с упругим взаимодействием ближайших соседей). Акустическая и оптическая моды.

2. Собственные и вынужденные колебания распределенных систем конечных размеров. Разложение вынужденных колебаний по собственным функциям системы (модам).

#### **Тема 1.4. Теория волн**

1. Римановы (простые) волны. Акустическое число Маха. Искажение профилей бегущих волн, генерация гармоник. Взаимодействие плоских волн и пучков.

2. Пилообразные волны. Нелинейное затухание и эффект насыщения. Учет вязкости. Уравнение Бюргерса. Акустическое число Рейнольдса.

3. Излучение звука пульсирующей сферой и колеблющейся сферой. Монопольное и дипольное излучение, сопротивление излучению и присоединенная масса. Поршневой излучатель в плоском экране. Ближнее и дальнее поле. Характеристика направленности.

#### **Тема 2.1. Акустические волны в средах с неоднородностями.**

1. Дифракция звука на телах канонической формы (сфера, цилиндр). Дифракция света на ультразвуке

2. Приближение геометрической акустики. Уравнения эйконала, переноса, дифференциальное уравнение луча.

3. Волны в узких трубах переменного сечения, уравнение Вебстера. Акустические волноводы. Волноводы с прямоугольным и круглым сечением

### **Тема 2.2. Акустика океана**

1. Рефракция звука в океане. Физические причины, вызывающие рефракцию, и её проявления в глубоком океане и мелком море.
2. Реверберация в волноводе океанического типа.
3. Интерференционный инвариант. Дислокации звукового поля.

### **Тема 2.3. Физическая акустика**

1. Скорость распространения и механизмы затухания акустических волн в газах, жидкостях, твердых телах, полимерах и биотканях.
2. Взаимодействие упругих и спиновых волн в магнетиках, магнитоакустический резонанс.

### **Тема 2.4. Техническая акустика**

1. Пассивная и активная гидролокация. Уравнение гидролокации.
2. Методы гидроакустической связи, навигации, рыболокации, съемки рельефа дна, определения глубины места и абсолютной скорости движения.
3. Звукопоглощение и звукоизоляция. Звукопоглощающие материалы и конструкции для воздушной среды. Пористые материалы, резонансные поглотители. Активные методы подавления шума.
4. 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.
5. Методы акустических измерений и калибровки преобразователей. Специальные помещения и установки для измерений в воздухе и в воде. Заглушенная камера, заглушенный гидробассейн.
6. Ультразвуковые методы измерений и неразрушающего контроля. Дефектоскопия промышленных изделий, строительных материалов и конструкций.

### **Тема 2.5. Технические средства для экспериментальных исследований. Обработка результатов в акустических экспериментах**

1. Излучающие и приемные электроакустические преобразователи. Метод электромеханических аналогий. Активные материалы для пьезоэлектрических и магнитострикционных преобразователей. Коэффициент электромеханической связи. Частотные характеристики, коэффициент нелинейных искажений. Коэффициент полезного действия излучателей и помехоустойчивость приемников
2. Параметрические излучающие и приемные антенны. Характеристики направленности

### **Раздел 4. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины по программе кандидатского экзамена по специальности**

Перечень вопросов для самостоятельного изучения дисциплины «Акустика» при подготовке к кандидатскому экзамену по специальности соответствует программе кандидатского экзамена по специальности «Акустика», утвержденной Ученым советом ИОФ РАН (протокол №\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.).

**7. Примерная тематика:****7.1. Курсовых работ**

Не предусмотрено учебным планом

**7.2. Научно-исследовательских работ и проектов**

Не предусмотрено учебным планом

**7.3. Рефератов**

Не предусмотрено учебным планом

**8. Ресурсное обеспечение.****8.1. Кадровый потенциал**

Аспирантура ИОФ РАН располагает кадровыми ресурсами, гарантирующими качество подготовки аспиранта по специальности 1.3.7. Акустика в соответствии с ФГТ.

**8.2. Материально-техническое оснащение.**

Для проведения занятий по дисциплине «Акустика», предусмотренной учебным планом подготовки аспирантов, имеется необходимая материально-техническая база, соответствующая действующим санитарным и противопожарным правилам и нормам, обеспечивающая проведение всех видов теоретической и практической подготовки:

- аудитории для лекционных и семинарских занятий, оснащенные презентационным оборудованием (ноутбук, проектор, экран) и маркерными досками;
- оборудование для проведения лекционных и семинарских занятий в дистанционном формате (в случае необходимости);
- лицензионное программное обеспечение для демонстрации презентаций в формате PowerPoint, OpenOffice или Portable Document Format.
- учебная литература и методические материалы для проведения самостоятельной работы по дисциплине.

**8.3. Образовательные технологии**

При реализации различных видов учебной работы (лекции, семинары, самостоятельная работа) используются следующие современные образовательные технологии:

- лекционная система обучения;
- информационно-коммуникационные технологии;
- исследовательские методы в обучении.

Программа дисциплины «Акустика» предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий в сочетании с внеаудиторной самостоятельной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков у обучающихся. Эффективность применения интерактивных форм обучения обеспечивается реализацией следующих условий:

- создание диалогического пространства в организации учебного процесса;
- использование принципов социально-психологического обучения в учебной и научной деятельности;
- применение интерактивных форм обучения, направленных на развитие внутренней активности аспиранта, стимулирование мотивации и интереса в области углубленного изучения акустики в общеобразовательном и профессиональном плане; повышение уровня активности и самостоятельности научно-исследовательской работы; развитие навыков анализа, критичности мышления, научной коммуникации.

Образовательные технологии предполагают проведение занятий в форме лекций с объяснением теоретического материала, семинаров с разбором лекционного материала и решением задач и самостоятельную работу. Самостоятельная работа аспирантов проводится в форме изучения отдельных теоретических вопросов по предлагаемой

литературе и самостоятельного решения задач с дальнейшим их разбором или обсуждением на аудиторных занятиях.

На занятиях может использоваться промежуточный контроль в виде решения задач по лекционному и семинарскому материалу.

## **9. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **9.1. Основная литература**

#### **9.1.1. Электронные учебные издания (учебники, учебные пособия).**

##### **9.1.2. Электронные базы данных, к которым обеспечен доступ.**

- Интернет-ресурсы научно-технической библиотеки ИОФ РАН  
<https://www.gpi.ru/about/library/education/>
- Научная электронная библиотека elibrary.ru;
- Электронные базы Web of Science и SCOPUS;
- Интернет-портал «Акустика. Русскоязычные источники», включающий базу данных из более чем 60 000 документов. Он состоит из трех, дополняющих друг друга, частей:  
 полнотекстовый архив "Акустического журнала за все годы его существования (363 выпуска, содержащие около 10 000 статей);  
 сигнальная информация, реализованная в выпусках двухмесячной периодичности с поиском по источникам, авторам, рубрикам и возможностью просмотра всего выпуска целиком. К настоящему времени сделано 50 выпусков, включающих около 600 источников.  
 информационно-поисковая система по всему материалу базы данных с поиском по источникам, авторам, ключевым словам и подробному рубрикатору.

[Акустика. Информационная система.](#)

#### **9.1.3. Учебники и учебные пособия**

1. Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Гидродинамика. -М.: Наука, 1986; Теория упругости. -М.: Наука, 1987.
2. Л.М.Бреховских, О.А.Годин. Акустика неоднородных сред Т.1,2.-М.: Наука, 2007, 2009.
3. Г.С.Горелик. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. - М.-Л.: Гостехтеориздат, 1950.
4. В.В.Мигулин, В.И.Медведев, Е.Р.Мустель, В.Н.Парыгин. Основы теории колебаний. - М.: Наука, 1988.
5. Н.В. Карлов, Н.А. Кириченко. Колебания, волны, структуры. Физматлит. 2008.
6. М.Б.Виноградова, О.В.Руденко, А.П.Сухоруков. Теория волн. - М.: Наука, 1990.
7. М.А.Исакович. Общая акустика. -М.: Наука, 1973.
8. Е.Скучик. Основы акустики. -М: Мир, 1976, том 1 и 2.
9. В.А.Красильников, В.В.Крылов. Введение в физическую акустику.
10. Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов Теоретический основы акустики океана-М.: Наука, 2007.
11. Т.Хаясака. Электроакустика. -М.: Мир, 1982.
12. Акустика в задачах (под ред. С.Н.Гурбатова, О.В.Руденко). -М.: Наука, 1996.
13. Р.Дж.Урик. Основы гидроакустики. -Л.: Судостроение, 1980.
14. Ультразвук. Маленькая энциклопедия (под ред. И.П.Голяминой). -М.: Сов. Энциклопедия
15. С.А. Ахманов, Ю.Е. Дьяков, А.С. Чиркин Введение в статистическую радиофизику и оптику. - М.: Наука, 1981

16. Дж. Бендат, А. Пирсол, Прикладной анализ случайных данных, М.: 1989.
17. И.Блохинцев. Акустика неоднородной движущейся среды. –М.: Наука, 1981.
18. С.В.Бирюков, Ю.В.Гуляев, В.В.Крылов, В.П.Плесский. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах. –М.: Наука, 1981.
19. О.В.Руденко, С.И.Солуян. Теоретические основы нелинейной акустики. –М.: Наука, 1975.
20. К.А.Наугольных, Л.А.Островский. Нелинейные волновые процессы в акустике. – М.: Наука, 1990.
21. Л.Ф.Лепендин. Акустика. –М.: Высшая школа, 1978.
22. Б.Г. Кацнельсон, В.Г. Петников Акустика мелкого моря. - М.: Наука, 1997.
23. Б.А.Агранат, М.Н.Дубровин, Н.Н.Хавский, Г.И.Эскин. Основы физики и техники ультразвука. –М.: Высшая школа, 1987.
24. В.И.Балакший, В.Н.Парыгин, Л.Е.Чирков. Физические основы акустооптики. –М.: Радио и связь, 1985.
25. Применение ультразвука в медицине. Физические основы (под ред. К.Хилла). – М.: Мир, 1989.
26. Справочник по гидроакустике. - Л.: Судостроение, 1988.
27. Л.И. Слабкий. Методы и приборы предельных измерений в экспериментальной физике. - М.: Наука, 1973.
28. А.И.Ахиезер, В.Г.Барьяхтар, С.В.Пелетминский. Спиновые волны. –М.: Наука, 1967.
29. Э.Дьелесан, Д.Руайе. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. – М.: Наука, 1982.
30. В.Э.Гусев, А.А.Карабутов. Лазерная оптоакустика. – М.: Наука, 1991.

## **10. Аттестация по дисциплине.**

Форма промежуточной аттестации по итогам обучения в 3, 4 и 5 семестрах – зачет, процедура аттестации в 3 и 4 семестрах включает решение контрольных задач и ответ на вопросы, в 5 семестре – ответ на вопросы.

Итоговая аттестация по дисциплине включает сдачу кандидатского экзамена экзаменационной комиссии, утвержденной локальным нормативным актом ИОФ РАН.

## **11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

### **11.1 Оценочные средства текущего контроля успеваемости и сформированности компетенций**

Для текущего контроля успеваемости применяется комплекс методик и диагностического инструментария: устный опрос, решение домашних задач по теме занятий, учет посещаемости занятий и активности аспирантов в ходе занятий.

### **11.2 Примерный перечень вопросов к зачету по дисциплине**

1. Уравнения гидродинамики идеальной и вязкой теплопроводящей жидкости. Пределы применимости приближения сплошной среды, связь с кинетическим описанием.

2. Акустическая, температурная и вихревая моды теплопроводящей среды. Адиабатическая и изотермическая скорости звука. Коэффициент затухания звука в среде с малыми вязкостью и теплопроводностью.
3. Сжимаемая и несжимаемая жидкость. Потенциальные и вихревые течения идеальной жидкости. Интегралы Бернулли и Коши-Лагранжа. Теорема Томпсона о циркуляции скорости жидкости.
4. Гравитационно-капиллярные волны на поверхности жидкости. Внутренние гравитационные волны в стратифицированной жидкости; частота Брента-Вайсяля.
5. Течения вязкой жидкости (Пуазейля, Куэтта). Затопленная струя. Пограничный слой, уравнения Прандтля.
6. Ударные волны. Изменение параметров среды при переходе через разрыв. Ширина ударного фронта. Скорость распространения ударных волн по невозмущенной среде.
7. Гидродинамические неустойчивости. Число Рейнольдса. Переход к турбулентности. Развитая турбулентность. Фракталы, число Фейгенбаума.
8. Распространение звука в движущейся среде. Движущиеся источники. Эффект Доплера. Излучение при сверхзвуковом движении, переходное излучение.
9. Радиационное давление и акустические течения
10. Подходы Эйлера и Лагранжа к описанию сплошной среды, основания для использования различных подходов в гидродинамике и теории упругости.
11. Уравнения теории упругости. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел. Линеаризация уравнений для малых возмущений. Продольные и сдвиговые волны в изотропном теле.
12. Волны в твердых средах в присутствии границ (Рэлея, Лэмба, Лява, клиновые волны).
13. Упругие волны в кристаллах. Волны в пьезо- и сегнетоэлектриках, магнетиках.
14. 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.
15. Колебательные системы с двумя и многими степенями свободы. Нормальные колебания. Вынужденные колебания, теорема взаимности.
16. Колебания периодических цепочек (точечные массы с упругим взаимодействием ближайших соседей). Акустическая и оптическая моды.
17. Собственные и вынужденные колебания распределенных систем конечных размеров. Разложение вынужденных колебаний по собственным функциям системы (модам).
18. Волновое уравнение (вывод из уравнений гидродинамики и теории упругости). Плоские однородные и неоднородные волны. Плотность и поток энергии.
19. Сферические и цилиндрические волны. Пространственно-временной спектр Фурье волнового поля; его представление в виде суммы гармонических плоских волн.
20. Распространение волнового пакета в диспергирующей среде. Фазовая и групповая скорости. Теория дисперсии Мандельштама-Леонтовича. Физические причины появления зависимости скорости звука от частоты.
21. Римановы (простые) волны. Акустическое число Маха. Искажение профилей бегущих волн, генерация гармоник. Взаимодействие плоских волн и пучков.
22. Пилообразные волны. Нелинейное затухание и эффект насыщения. Учет вязкости. Уравнение Бюргерса. Акустическое число Рейнольдса.
23. Излучение звука пульсирующей сферой и колеблющейся сферой. Монопольное и дипольное излучение, сопротивление излучению и присоединенная масса.

- Поршневой излучатель в плоском экране. Ближнее и дальнее поле. Характеристика направленности.
24. Отражение и преломление акустических волн на плоской границе раздела двух сред. Закон Снеллиуса. Формулы Френеля. Поле в среде при падении под углом, большим критического. Плотность и поток энергии. Акустический импеданс. Отражение от импедансной границы.
  25. Принцип Гюйгенса-Френеля. Формулы Грина и Кирхгофа. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Дифракция на круглом и прямоугольном отверстии (экране), принцип Бабиня.
  26. Рассеяние звука на малых препятствиях, пузырьках газа в жидкостях и неровностях границ.
  27. Дифракция звука на телах канонической формы (сфера, цилиндр).
  28. Приближение геометрической акустики. Уравнения эйконала, переноса, дифференциальное уравнение луча.
  29. Волны в узких трубах переменного сечения, уравнение Вебстера. Акустические волноводы. Волноводы с прямоугольным и круглым сечением.
  30. Акустический волновод в глубоком океане (подводный звуковой канал) и в мелком море (плоскостной придонный и приповерхностный волновод). Типичные профили скорости звука в указанных волноводах и их пространственная и временная изменчивость. Характеристики морской поверхности и морского дна.
  31. Методы описания звукового поля в волноводе океанического типа и их сравнительный анализ. Звуковые лучи, волноводные моды и их взаимодействие, метод параболического уравнения
  32. Рефракция звука в океане. Физические причины, вызывающие рефракцию, и её проявления в глубоком океане и мелком море.
  33. Реверберация в волноводе океанического типа.
  34. Интерференционный инвариант. Дислокации звукового поля.
  35. Акустические шумы в океане.
  36. Скорость распространения и механизмы затухания акустических волн в газах, жидкостях, твердых телах, полимерах и биотканях.
  37. Акустические аномалии в области фазовых переходов в сегнетоэлектриках и сегнетоэластиках.
  38. Взаимодействие упругих и спиновых волн в магнетиках, магнитоакустический резонанс.
  39. Связанные магнитоупругие волны вблизи спиновой переориентации. Гигантская акустическая нелинейность магнетиков.
  40. Параметрическое обращение волнового фронта (ОВФ) ультразвука. ОВФ-акустоскопия. Магнитоакустические устройства обработки сигналов, сенсоры магнитных и механических величин.
  41. Пассивная и активная гидролокация. Уравнение гидролокации.
  42. Методы гидроакустической связи, навигации, рыболокации, съемки рельефа дна, определения глубины места и абсолютной скорости движения.
  43. Методы акустических измерений и калибровки преобразователей. Специальные помещения и установки для измерений в воздухе и в воде. Заглушенная камера, заглушенный гидробассейн.
  44. Механические, аэродинамические и гидродинамические источники шумов. Аэродинамическая генерация звука. Уравнение Лайтхилла.



45. Звукопоглощение и звукоизоляция. Звукопоглощающие материалы и конструкции для воздушной среды. Пористые материалы, резонансные поглотители. Активные методы подавления шума.
46. Ультразвуковая медицинская диагностика. Интенсивный ультразвук в терапии и хирургии.
47. Оптоакустика. Лазерная искровая спектроскопия.
48. Термооптическое возбуждение акустических волн. Передаточные функции термооптического возбуждения ультразвука и профили возбуждаемых акустических импульсов.
49. Ультразвуковые методы измерений и неразрушающего контроля. Дефектоскопия промышленных изделий, строительных материалов и конструкций.
50. 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.
51. 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.
52. Излучающие и приемные электроакустические преобразователи. Метод электромеханических аналогий. Активные материалы для пьезоэлектрических и магнитострикционных преобразователей. Коэффициент электромеханической связи. Частотные характеристики, коэффициент нелинейных искажений. Коэффициент полезного действия излучателей и помехоустойчивость приемников.
53. Методы измерения характеристик акустических полей: колебательной скорости, акустического давления, скорости распространения, поглощения, интенсивности.
54. Гидродинамические излучатели и гидрофоны (приемники акустического давления и градиента давления). Гидроакустические антенны. Характеристики направленности. Методы электронного формирования характеристик направленности антенных решеток и управления ими.
55. Параметрические излучающие и приемные антенны. Характеристики направленности.
56. Статистическая обработка результатов экспериментов. Спектральный и корреляционный анализ. Ошибки измерений.

## **12. Методические рекомендации аспирантам по освоению дисциплины**

Аспиранты должны быть заранее ознакомлены с графиком учебного процесса, содержанием дисциплины и методикой проведения занятий. Посещаемость учебных занятий является обязательной для обучающихся, как и ведение конспектов, записей. Отработка пропущенных занятий предполагает самостоятельную работу аспиранта с учебной литературой и осуществляется в форме собеседования по теме пропущенного занятия.

### **13. Методические рекомендации преподавателям по организации обучения по дисциплине**

#### **13.1 Порядок проведения лекции**

*Вводная часть* включает формулировку темы лекции с краткой аннотацией предлагаемых для изучения вопросов, характеристику места и значения данной темы в курсе.

*Основная часть* лекции имеет своей целью раскрытие содержания основных вопросов и определяется логической структурой плана лекции.

В *заключительной части* лектор проводит обобщение наиболее важных и существенных вопросов, делает выводы, отвечает на вопросы слушателей, формулирует задачи для самостоятельной работы аспирантов и рекомендует соответствующую литературу.

#### **13.2 Порядок проведения семинара**

Во вводной части решаются организационные задачи семинарского занятия: проверка готовности аудитории и подготовленности аспирантов к занятию, формулировка темы, цели и задач занятия.

Основная часть занятия предполагает организацию дискуссии: постановку проблемы, выделение основных направлений. Выступление докладчиков, раскрывающих основные положения по вопросу. Выступления оппонентов, раскрывающих свое видение проблемы, дискуссия по докладу.

В заключительной части подводятся итоги занятия, дается оценка результатов работы аспирантов.

#### **13.3 Организация самостоятельной работы аспирантов**

Основными формами самостоятельной работы и контроля аспирантов являются:

Выполнение индивидуальных заданий (как репродуктивного, так и творческого характера), позволяющих диагностировать уровень сформированности у аспирантов знаний, умений и навыков по дисциплине.

Собеседование – форма учебной деятельности, специальная беседа преподавателя с аспирантом, рассчитанная на выяснение объема знаний аспиранта по определенному разделу, теме, проблеме и т.п., позволяющая оценить их умение аргументировать собственную точку зрения, предполагающее всестороннее обсуждение какого-либо вопроса, проблемы или сопоставлении информации, идей, мнений, предложений.

### **14. Описание критериев оценивания знаний обучаемых, шкал их оценивания**

#### **14.1. Критерии оценивания знаний обучаемых на зачете по дисциплине:**

Оценка «Зачтено»: Обучающийся обнаружил знание основного учебно-программного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по специальности, справился с выполнением заданий и контрольных работ, предусмотренных программой дисциплины.

Оценка «Не зачтено»: Обучающийся обнаружил значительные пробелы в знаниях основного учебно-программного материала, допустил принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий и не способен продолжить обучение или приступить по окончании аспирантуры к профессиональной деятельности без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

#### **14.2. Критерии оценивания знаний обучаемых на кандидатском экзамене по специальности:**

Оценка ставится по каждому из вопросов кандидатского экзамена по специальности, оценка за экзамен определяется как среднее арифметическое из оценок по трем вопросам экзамена с соответствующим округлением до целочисленной по правилам арифметических операций. При наличии оценки «неудовлетворительно» по одному из вопросов ставится общая оценка «неудовлетворительно».

Оценка «Отлично»: В ответе качественно раскрыто содержание темы. Ответ хорошо структурирован. Прекрасно освоен понятийный аппарат. Продемонстрирован высокий уровень понимания материала. Продемонстрировано превосходное умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены полные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Хорошо»: Основные вопросы темы раскрыты. Структура ответа в целом адекватна теме. Хорошо освоен понятийный аппарат. Продемонстрирован хороший уровень понимания материала. Продемонстрировано хорошее умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены частичные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Удовлетворительно»: Тема раскрыта частично. Ответ структурирован недостаточно. Понятийный аппарат освоен частично. Продемонстрировано понимание отдельных положений из материала по теме. Продемонстрированы удовлетворительное умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены фрагментарные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Неудовлетворительно»: Тема не раскрыта. Ответ не структурирован. Понятийный аппарат освоен в недостаточном объеме. Понимание материала фрагментарное или отсутствует. Продемонстрировано неумение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Не представлены ответы на дополнительные вопросы по теме.

Программу разработали:

ВРИО директора НЦВИ, к.ф.-м.н. М.Л. Лямшев

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Заместитель директора НЦВИ, д.ф.-м.н. Г.А. Ляхов

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Главный научный сотрудник, д.ф.-м.н. В.Г. Петников

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Главный научный сотрудник, д.ф.-м.н. В.Л. Преображенский

\_\_\_\_\_  
(подпись)