



**ПРОГРАММА-МИНИМУМ**  
кандидатского экзамена по специальности  
**1.3.7. Акустика**  
по физико-математическим наукам

**Введение**

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: гидродинамика и теория упругости, теория колебаний и волн, физическая акустика, техническая акустика. Программа разработана экспертным советом по физике Высшей аттестационной комиссии при участии Акустического института им. акад. Н.Н.Андреева и МГУ им. М.В.Ломоносова.

**I. Гидродинамика и теория упругости**

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-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. Гидродинамика сверхтекучей жидкости. Второй звук.
9. Подходы Эйлера и Лагранжа к описанию сплошной среды, основания для использования различных подходов в гидродинамике и теории упругости.
10. Уравнения теории упругости. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел. Линеаризация уравнений для малых возмущений. Продольные и сдвиговые волны в изотропном теле.
11. Волны в твердых средах в присутствии границ (Релея, Лэмба, Лява, клиновые волны).
12. Упругие волны в кристаллах. Волны в пьезо- и сегнетоэлектриках, магнетиках.

**II. Теория колебаний и волн**

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 Релея.
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).

5. Колебания недеформируемых тел, погруженных в жидкость. Сила сопротивления колебаниям сферы в идеальной и вязкой среде.
6. Волновое уравнение (вывод из уравнений гидродинамики и теории упругости). Плоские однородные и неоднородные волны. Плотность и поток энергии.
7. Сферические и цилиндрические волны. Пространственно-временной спектр Фурье волнового поля; его представление в виде суммы гармонических плоских волн.
8. 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.
9. Распространение волнового пакета в диспергирующей среде. Фазовая и групповая скорости. Теория дисперсии Манделъштама-Леонтовича. Физические причины появления зависимости скорости звука от частоты.
10. Принцип Гюйгенса-Френеля. Формулы Грина и Кирхгофа. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Дифракция на круглом и прямоугольном отверстии (экране), принцип Бабиня.
11. 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.
12. Волны в средах с крупномасштабными неоднородностями. Приближение геометрической акустики. Уравнения эйконала, переноса, дифференциальное уравнение луча. Лучи и поле волны в слоисто-неоднородных средах. Ход лучей в подводном звуковом канале.

### III. Физическая акустика

1. Скорость распространения и механизмы затухания акустических волн в газах, жидкостях, твердых телах, полимерах и биотканях.
2. Способы возбуждения и приема акустических волн в различных средах и частотных диапазонах. Электроакустические преобразователи: электродинамические, пьезоэлектрические, магнитострикционные. Электромеханические аналогии.
3. Методы измерения характеристик акустических полей: колебательной скорости, акустического давления, скорости распространения, поглощения, интенсивности.
4. Волны в узких трубах переменного сечения, уравнение Вебстера. Акустические волноводы (плоский слой, волноводы с прямоугольным и круглым сечением). Нормальные волны.
5. Дифракция звука на телах канонической формы (сфера, цилиндр). Дифракция света на ультразвуке.
6. Рассеяние звука на малых препятствиях, пузырьках газа в жидкостях и неровностях границ.
7. Распространение звука в движущейся среде. Движущиеся источники. Эффект Доплера. Излучение при сверхзвуковом движении, переходное излучение.
8. Флуктуации амплитуды, фазы и угла прихода луча при распространении звука в случайно-неоднородной среде.
9. Аэродинамическая генерация звука. Уравнение Лайтхилла.
10. Радиационное давление и акустические течения.
11. Римановы (простые) волны. Акустическое число Маха. Искажение профилей бегущих волн, генерация гармоник. Взаимодействие плоских волн и пучков.
12. Пилообразные волны. Нелинейное затухание и эффект насыщения. Учет вязкости. Уравнение Бюргерса. Акустическое число Рейнольдса.

### IV. Техническая акустика

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. Преобразователи для воздушной среды. Диффузорные и рупорные громкоговорители. Микрофоны – приемники звукового давления и градиента давления. Газодинамические источники звука, свистки, сирены.
  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. Профиль скорости звука и структура звукового поля в океане. Подводный звуковой канал. Приповерхностный канал. Звук в мелком море.
  5. Пассивная гидролокация. Шумы океана и корабля. Выделение сигнала из помех. Оптимальная фильтрация. Уравнение дальности, методы и точность пеленгования.
  6. Активная гидролокация. Отражение звука корпусом и кильватерным следом корабля. Виды зондирующих сигналов, их оптимальная обработка в присутствии шумовой и реверберационной помех.
  7. Параметрические излучающие и приемные антенны. Характеристики направленности.
  8. Методы гидроакустической связи, навигации, рыболокации, съемки рельефа дна, определения глубины места и абсолютной скорости движения.
  9. Механические, аэродинамические и гидродинамические источники шумов. Транспортные шумы.
  10. Звукопоглощение и звукоизоляция. Звукопоглощающие материалы и конструкции для воздушной среды. Пористые материалы, резонансные поглотители. Активные методы подавления шума.
  11. Статистическая и волновая теория акустики помещений. Оптимальное время реверберации. Акустика больших помещений (неравномерность поля, искажения нестационарных сигналов, явление эхо) и методы ее улучшения.
  12. Методы акустических измерений и калибровки преобразователей. Специальные помещения и установки для измерений в воздухе и в воде. Заглушенная камера, заглушенный гидробассейн.
  13. Ультразвуковые технологии (осаждение аэрозолей, очистка поверхностей, дегазация жидкостей, эмульгирование, обработка материалов, сварка).
  14. Ультразвуковая медицинская диагностика. Интенсивный ультразвук в терапии и хирургии.
  15. Ультразвуковые методы измерений и неразрушающего контроля. Дефектоскопия промышленных изделий, строительных материалов и конструкций.
  16. 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.
  17. 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.

#### Рекомендуемая основная литература

1. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Гидродинамика. -М.: Наука, 1986; Теория упругости. -М.: Наука, 1987.
2. Л.М.Бреховских, В.В.Гончаров. Введение в механику сплошных сред. -М.: Наука, 1982.

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. М.Б.Виноградова, О.В.Руденко, А.П.Сухоруков. Теория волн. - М.: Наука, 1990.
6. М.А.Исакович. Общая акустика. -М.: Наука, 1973.
7. Е.Скучик. Основы акустики. -М: Мир, 1976, том 1 и 2.
8. В.А.Красильников, В.В.Крылов. Введение в физическую акустику. -М.: Наука, 1984.
9. Т.Хаясака. Электроакустика. -М.: Мир, 1982.
10. Акустика в задачах (под ред. С.Н.Гурбатова, О.В.Руденко). -М.: Наука, 1996.
11. Р.Дж.Урик. Основы гидроакустики. -Л.: Судостроение, 1980.
12. Ультразвук. Маленькая энциклопедия (под ред. И.П.Голяминой). -М.: Сов. Энциклопедия, 1979.

#### Дополнительная литература

1. Д.И.Блохинцев. Акустика неоднородной движущейся среды. -М.: Наука, 1981.
2. С.В.Бирюков, Ю.В.Гуляев, В.В.Крылов, В.П.Плесский. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах. -М.: Наука, 1981.
3. И.А.Викторов. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. -М.: Наука, 1981.
4. О.В.Руденко, С.И.Солуян. Теоретические основы нелинейной акустики. -М.: Наука, 1975.
5. К.А.Наугольных, Л.А.Островский. Нелинейные волновые процессы в акустике. - М.: Наука, 1990.
6. Л.Ф.Лепендин. Акустика. -М.: Высшая школа, 1978.
7. Г.Кайно. Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. -М.: Мир, 1990.
8. А.А.Клещев, И.И.Клюкин. Основы гидроакустики. -Л.: Судостроение, 1987.
9. И.Г.Михайлов, В.А.Соловьев, Ю.П.Сырников. Основы молекулярной акустики. -М.: Наука, 1964.
10. Б.А.Агранат, М.Н.Дубровин, Н.Н.Хавский, Г.И.Эскин. Основы физики и техники ультразвука. -М.: Высшая школа, 1987.
11. В.И.Балакший, В.Н.Парыгин, Л.Е.Чирков. Физические основы акустооптики. -М.: Радио и связь, 1985.
12. В.К.Иофе, В.Г.Корольков, М.А.Сапожков. Справочник по акустике. -М.: Связь, 1979.
13. Справочник по технической акустике. - Л.: Судостроение, 1980.
14. Применение ультразвука в медицине. Физические основы (под ред. К.Хилла). -М.: Мир, 1989.

**ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА**  
кандидатского экзамена по специальности  
**1.3.7. Акустика**

*Часть I. Нелинейная акустика [1-5]*

**1.1 . Основные уравнения.**

Общие уравнения нелинейной акустики. Нелинейные параметры газов и жидкостей. Нелинейность морской среды. Методы измерения нелинейных параметров среды.

**1.2. Волны конечной амплитуды в идеальной и вязкой жидкости.**

Решение Римана для плоской волны. Простые волны. Отражение волн конечной амплитуды. Стоячие волны конечной амплитуды. Акустическое число Рейнольдса. Пилообразные волны. Уравнение Бюргерса, его решения. Сферические нелинейные волны: расходящиеся и сходящиеся.

**1.3. Нелинейные акустические пучки.**

Уравнение Заболотской-Хохлова. Относительное влияние нелинейности, дифракции и диссипации в интенсивных звуковых пучках. Изотропизация поля интенсивного излучателя.

**1.4. Взаимодействие акустических волн.**

Понятие о параметрических излучателях звука, основные режимы их работы, предельные характеристики. Параметрические приемники. Нелинейное усиление и рассеяние звука. Взаимодействие акустических волн в волноводах. Параметрические генераторы звука. Вынужденное рассеяние звука. Тепловая самофокусировка. Обращение волнового фронта.

**1.5. Волны в пузырьковой среде.**

Монопольные и дипольные колебания пузырька. Дисперсионные характеристики жидкости с пузырьками газа, нелинейные эффекты. Уравнение Релея. Сила Бьеркнисса. Поведение пузырька в неоднородном поле. Рассеяние звука пузырьками. Самовоздействие звука в пузырьковой среде.

**1.6. Нелинейная акустика твердых тел.**

Основы классической нелинейной теории упругости. Модули третьего порядка. Физическая и геометрическая нелинейность. Взаимодействие акустических волн в твердых телах. «Неклассическая» акустическая нелинейность структурно- неоднородных сред. Основные типы нелинейных взаимодействий в таких средах.

*Часть II. Статистические явления при распространении звука в океане. [6-9]*

**2.1. Физические факторы, ответственные за стохастизацию звуковых полей в океане**

Рассеяние звука на ветровых и внутренних волнах, течениях, неровностях рельефа дна, объемных неоднородностях. Характеристики флуктуаций параметров среды: спектры ветрового волнения, спектры турбулентных флуктуаций скорости звука, показатели и индикатриссы рассеяния пассивной примеси.

**2.2. Методы анализа однократного рассеяния на объемных и поверхностных неоднородностях.**

Метод малых возмущений (борновское приближение). Параметр Рэлея. Индикатриссы рассеяния на крупномасштабных и мелкомасштабных неоднородностях. Затухание среднего поля. Селективный характер рассеяния, условие Вульфа - Брегга.

Описание дифракционных эффектов с помощью модели хаотического экрана.

Применение метода геометрической оптики в среде со случайным показателем преломления. Флуктуации уровня и фазы сигнала. Регулярная и стохастическая многолучевость в подводном звуковом канале.

Рассеяние звука на плавных крупномасштабных поверхностных неоднородностях. Метод касательной плоскости (метод Кирхгофа).

**2.3. Методы теории многократного рассеяния волн.**

Метод плавных возмущений, приближение марковского процесса, уравнение Дайсона и Бете-Солпитера, уравнение переноса излучения.

Модовое описание поля в случайно-неоднородном подводном звуковом канале: уравнения для статистических моментов амплитуд нормальных волн, перераспределение звуковой энергии между модами в процессе распространения.

## **2.4. Теория поверхностной, объемной и донной реверберации.**

*Часть III. Техническая акустика. Электроакустика [10]*

**3.1. Виды электромеханического преобразования энергии.** Активные материалы для магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей. Излучающие и приемные электроакустические преобразователи. Их характеристики.

**3.2. Преобразователи для воздушной и водной среды.** Диффузорные и рупорные громкоговорители, микрофоны — приемники звукового давления и градиента давления. Головные телефоны. Пневматические громкоговорители, свистки, сирены. Преобразователи для водной среды. Пакетные, стержневые и кольцевые излучатели. Электродинамические излучатели. Гидрофоны — приемники звукового давления и градиента давления. Векторно-фазовые приемники. Преобразователи для твердой среды.

**3.3. Принципы действия электромагнитных преобразователей мембранного и поршневого типов:** диапазон частот их использования; электромагнитные низкочастотные излучатели; их параметры, преимущества перед другими типами излучателей низкочастотного диапазона.

*Часть IV. Борьба с шумами и вибрациями [10-12]*

Механические, аэродинамические и гидродинамические источники шумов. Вибрации. Классификации вибраций. Понятие о нормировании шумов и вибраций.

Звукоизоляция, виброизоляция, вибропоглощение. Измерения вибраций и шумов. Понятие об использовании шумов и вибраций для диагностики состояния машин и сооружений.

*Часть V. Акустические измерения [13-16]*

**5.1. Методы измерений основных акустических параметров: звукового давления, перемещений и ускорений.** Абсолютная калибровка преобразователей. Калибровка методом взаимности. Методы калибровки звукоприемников в воздухе и в воде.

**5.2. Основы теории гидроакустических антенн.**

Характеристики направленности и выигрыш антенны. Антенные решетки. Обработка сигналов в акустических антеннах и системах вибродатчиков. Подавление помех в антенных решетках. Оптимальные и адаптивные методы. Основные эффекты статистической теории антенн. Влияние когерентных свойств сигнала на выигрыш протяженной антенны.

## **Литература**

1. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. Москва, Наука, 1966, 520 с.
2. Наугольных К.А., Островский Л.А. Нелинейные волновые процессы в акустике. М., Наука, 1990, 237 с.
3. Бахвалов Н.С., Жилейкин Я.М., Заболотская Е.а. Нелинейная теория звуковых пучков. М., Наука, 1982.
4. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л., Судостроение, 1981.
5. В.Ю. Зайцев, С.Н. Гурбатов, Н.В. Прончатов-Рубцов, "Нелинейные акустические явления в структурно-неоднородных средах", Изд ИПФ РАН, Н.Новгород, 2009, (268 С.)
6. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч.2. Случайные поля. М., Наука, 1978.
7. Распространение звука во флуктуирующем океане. Под ред. С.Флатте. М., Мир, 1982.
8. Чернов Л.А. Волны в случайно-неоднородных средах. М., Наука, 1975.

9. Колер В., Папаниколау Дж. К. Распространение волн в случайно-неоднородном океане. В кн. «Распространение волн и подводная акустика». Под. ред. Дж. Б. Келлера и Дж.С. Папдакиса. М., Мир, 1980.
10. Боббер Р.Дж. Гидроакустические измерения / Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. 362 с.
11. Колесников А.Е. Акустические измерения. Л., Судостроение, 1983.
12. Колесников А.Е. Шум и вибрация. Л., Судостроение, 1988.
13. Смаришев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. Справочник по расчету направленных свойств гидроакустических антенн. -- Л.: Судостроение, 1984. -- 304 с.
14. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. -- М.: Радио и связь, 1986. -- 448 с.
15. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984.
16. Хаясака Т. Электроакустика. М.: Мир, 1982.