

**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:

**Применение ультразвука в медицине (Application of ultrasound in medicine)**

---

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:**

Д.ф.-м.н., доцент Сапожников Олег Анатольевич, кафедра акустики физического факультета МГУ

Д.ф.-м.н., доцент Хохлова Вера Александровна, кафедра акустики физического факультета МГУ

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

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины**

Предметом курса является систематическое изложение физических основ и принципов применения ультразвуковых волн в медицине. Актуальность такого курса обусловлена широким внедрением в современную медицинскую практику различных акустических методов. В курсе рассматриваются как основные закономерности распространения ультразвука в биологической ткани, так и конкретные приложения ультразвуковых методов в медицинской диагностике и терапии.

Дисциплина реализуется на 4 курсе в 8 семестре специалитета, входит в вариативную часть и является спецкурсом по выбору для освоения обучающимися по специализации «Акустика».

Объем дисциплины составляет 2 з.е., в том числе 34 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, и 38 академических часа, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Промежуточная аттестация по дисциплине – зачёт в 8 семестре.

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

Дисциплина «Ультразвук в медицине» входит в вариативную часть программы специалитета «Фундаментальная и прикладная физика» (блок «Профессиональный» вариативной части) и является спецкурсом по выбору 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 волновой физики.

### 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 принципы работы существующих ультразвуковых устройств, используемых в медицине, перспективные ультразвуковые методы, которые могут найти клиническое применение в ближайшем будущем.<br>Уметь рассчитывать параметры ультразвуковых полей при их распространении в теле человека и параметры силового и теплового воздействия ультразвука на биологическую ткань.<br>Владеть основными методами ведения теоретических расчетов и научных исследований в области применения ультразвука в медицине. |

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., в том числе: 34 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 38 академических часов, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Контактная работа включает в себя:

занятия лекционного типа (лекции) и групповые консультации.

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),<br><br>Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)  | Всего (ак.ч.)         | В том числе   |                           |  |  |       | Самостоятельная работа обучающегося, академические часы | Форма текущего контроля успеваемости, наименование |
|---|-----------------------|---|---------------------------|--|--|-------|---|--|
|   |                       | Контактная работа<br>(работа во взаимодействии с преподавателем)<br><i>Виды контактной работы, академические часы<sup>1</sup></i> |                           |  |  | Всего |   |  |
|   |                       | Занятия лекционного типа (лекции)   | Занятия семинарского типа |  |  |       |   |  |
| Семинары  | Лабораторные занятия* |   | Практические занятия*     |  |  |       |   |  |
| <b>РАЗДЕЛ 1.</b> Краткая сводка свойств акустических волн, основные понятия и представления.<br><b>Тема №1 (2 часа)</b><br>Интеграл Рэля как основа расчета полей ультразвуковых излучателей. Границы применимости. Связь акустического поля преобразователя в режиме излучения с пространственным распределением его чувствительности в режиме приема. Теорема взаимности. Простейшие источники ультразвука. Круглый и | 4                     | 2   |                           |  |  | 2     | 2   |  |

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

|  |   |   |  |  |  |   |   |  |
|--|---|---|--|--|--|---|---|--|
| прямоугольный поршневые излучатели. Ближнее и дальнее поля.  |   |   |  |  |  |   |   |  |
| <b>РАЗДЕЛ 2.</b> Источники ультразвука, применяемые в медицине<br><b>Тема №2 (2 часа)</b><br>Фокусирующие преобразователи. Акустические линзы. Продольный и поперечный размеры фокальной области. Пространственное разрешение. Антенные решетки. Диаграмма направленности. Принцип электронного сканирования. Непрерывный и импульсный режим излучения. Продольное разрешение в импульсном режиме. Ультразвуковые частоты, используемые в медицинском ультразвуке, их выбор.   | 4 | 2 |  |  |  | 2 | 2 |  |
| <b>РАЗДЕЛ 3.</b> Акустические свойства биологических тканей<br><b>Тема №3 (2 часа)</b><br>Биологическая ткань как упругая среда. Клетка как основа биологической ткани. Основные виды биологических тканей и их акустические свойства. Вязкоупругие свойства квазитвердых тел. Скорость звука, ее зависимость от температуры и давления. Количественные значения скорости звука в различных тканях. Методы измерения.<br><b>Тема №4 (2 часа)</b><br>Поглощение и рассеяние ультразвука в биологических тканях. Процессы релаксации. Основные механизмы поглощения. Рассеяние ультразвука в различных | 8 | 4 |  |  |  | 4 | 4 |  |

|  |   |   |  |  |  |   |   |                           |
|--|---|---|--|--|--|---|---|---------------------------|
| биологических тканях. Сечения взаимодействия акустической волны с тканью. Модели биологических сред: дискретные рассеиватели, неоднородный континуум рассеивателей. Акустический импеданс. Отражение ультразвука от границ раздела различных видов биоткани.   |   |   |  |  |  |   |   |                           |
| <b>РАЗДЕЛ 4.</b> Эхо-импульсные методы визуализации<br><b>Тема №5 (2 часа)</b><br>Принципы ультразвуковой визуализации. Сравнительный анализ рентгеновского и ультразвукового методов визуализации. Акустическая визуализация в режиме А. Ультразвуковая визуализация в режиме В. Механические и электронные В-сканеры.<br><b>Тема №6 (2 часа)</b><br>Ультразвуковая визуализация в режиме М. Ультразвуковая визуализация в режиме С. Применение УЗ визуализации в акушерстве, офтальмологии, исследовании внутренних органов. | 8 | 4 |  |  |  | 4 | 4 | <i>Контрольная работа</i> |
| <b>РАЗДЕЛ 5.</b> Прочие методы ультразвуковой визуализации.<br><b>Тема №7 (2 часа)</b><br>Дифракционная томография. Акустическая голография. Акустическая микроскопия.   | 5 | 2 |  |  |  | 2 | 3 |                           |
| <b>РАЗДЕЛ 6.</b> Диагностика сдвиговой упругости биологических тканей<br><b>Тема №8 (2 часа)</b><br>Визуализация, основанная на диагностике сдвигового модуля сред. Использование сдвиговых  | 5 | 2 |  |  |  | 2 | 3 |                           |

|   |   |   |  |  |  |   |   |                           |
|---|---|---|--|--|--|---|---|---------------------------|
| волн.   |   |   |  |  |  |   |   |                           |
| <b>РАЗДЕЛ 7.</b> Эффект Доплера и принципы доплеровского измерения скорости кровотока<br><b>Тема №9 (2 часа)</b><br>Оценка скорости движения по доплеровскому сдвигу. Спектр доплеровского сигнала при непрерывном и импульсном зондировании. Доплеровский прибор непрерывного излучения.<br><b>Тема №10 (2 часа)</b><br>Импульсно-доплеровский измеритель скорости кровотока. Артефакты ультразвуковых изображений в доплеровском режиме.  | 8 | 4 |  |  |  | 4 | 4 |                           |
| <b>РАЗДЕЛ 8.</b> Эффекты, сопровождающие распространение ультразвуковых волн в тканях, и их использование<br><b>Тема №11 (2 часа)</b><br>Тепловые эффекты, вызываемые ультразвуком. Физиологические основы ультразвуковой терапии. Ультразвук при лечении рака. Гипертермия опухолей. Хирургия с помощью высокоинтенсивного фокусированного ультразвука.<br><b>Тема №12 (2 часа)</b><br>Кавитация как причина повреждения биологической ткани. Виды кавитации. Пороги кавитации. Методы контроля кавитации. Радиационное давление и генерация сдвиговых напряжений. Роль нелинейных акустических эффектов для ультразвуковых полей, применяемых в медицине. | 8 | 4 |  |  |  | 4 | 4 | <i>Контрольная работа</i> |

|  |    |   |  |  |  |   |   |  |
|--|----|---|--|--|--|---|---|--|
| <p><b>РАЗДЕЛ 9.</b> Ударно-волновое разрушение биологических конкрементов.<br/> <b>Тема №13 (2 часа)</b><br/> Ударно-волновые источники: электромагнитные, электроразрядные, пьезоэлектрические, лазерные. Принцип экстракорпоральной литотрипсии.<br/> <b>Тема №14 (2 часа)</b><br/> Устройство и параметры современных литотриптеров. Особенности фокусировки ударных импульсов. Механизмы разрушения почечных камней.</p> | 10 | 4 |  |  |  | 4 | 6 |  |
| <p><b>РАЗДЕЛ 10.</b> Принципы введения в медицинскую практику новых ультразвуковых методов.<br/> <b>Тема №15 (2 часа)</b><br/> Эксперименты in vivo и in vitro. Фантомы биологических тканей. Практика и уровни облучения. Исследования на изолированных клетках. Исследования на многоклеточных организмах. Эффекты на костях и мягких тканях. Воздействие на кровь и кровеносные сосуды.</p>                               | 3  | 2 |  |  |  | 2 | 1 |  |
| <p><b>РАЗДЕЛ 11.</b> Проблемы безопасности применений ультразвука в медицине.<br/> <b>Тема №16 (2 часа)</b><br/> Параметры ультразвука, характеризующие его безопасность в различных применениях. Оценка безопасности применения ультразвука в медицине. Измерение биологически эффективных экспозиций и доз.</p>  | 3  | 2 |  |  |  | 2 | 1 |  |

|   |           |           |  |  |  |   |           |              |
|---|-----------|-----------|--|--|--|---|-----------|--------------|
| РАЗДЕЛ 12. Демонстрация работы ультразвукового сканера. Заключительный коллоквиум<br>Демонстрация (1 час). Показ работы ультразвукового сканера. Обсуждение.<br>Заключительный коллоквиум (1 час) | 3         | 2         |  |  |  | 2 | 1         |              |
| Промежуточная аттестация <b>зачёт</b>   | 3         |           |  |  |  |   | 3         | <b>Зачёт</b> |
| <b>Итого</b>  | <b>72</b> | <b>34</b> |  |  |  |   | <b>38</b> |              |

\*

Лабораторные занятия, практические занятия относятся к практической подготовке обучающихся.

## **6. Фонд оценочных средств для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)**

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

### **Вопросы к зачету по дисциплине «Ультразвук в медицине»**

1. Какое расстояние называется длиной Рэлея? Пояснить качественно, какова структура ультразвукового поля на расстояниях меньших и больших длины Рэлея.
2. Объяснить качественно, почему амплитуда поля в ближнем поле плоского поршневого излучателя осциллирует.
3. Нарисовать качественно диаграмму направленности плоского поршневого излучателя. Что такое боковые лепестки? Чем определяется ширина диаграммы направленности.
4. Что такое коэффициент концентрации для сферического фокусирующего излучателя. Как он связан с геометрией излучателя?
5. Нарисовать качественно распределение амплитуды поля в фокальной плоскости сферического излучателя с равномерным распределением амплитуды на его поверхности. Чем определяются поперечное разрешение ( $\delta_L$ ) такого излучателя?
6. Нарисовать качественно распределение амплитуды поля вдоль оси сферического излучателя с равномерным распределением амплитуды на его поверхности. Чем определяются продольное разрешение ( $\delta_a$ ) такого излучателя?
7. Нарисовать качественно ход лучей в фокусирующей ультразвуковой линзе. Чем определяется фокальное расстояние линзы?
8. Как зависит от частоты коэффициент затухания ультразвука в биологических тканях. Чем определяется частотный диапазон, в котором работают ультразвуковые диагностические устройства?
9. Перечислить и охарактеризовать качественно методы измерения скорости звука в биологических тканях.
10. Перечислить и охарактеризовать качественно методы измерения коэффициента затухания звука в биологических тканях.
11. Перечислить и охарактеризовать качественно методы измерения коэффициента поглощения звука в биологических тканях.
12. Как возбуждают короткие ультразвуковые импульсы в пьезокерамических преобразователях? Как длительность импульса зависит от добротности излучателя?
13. Что такое разрешение по дальности в импульсных ультразвуковых системах, как оно связано с длительностью импульса?
14. Что такое А – режим в ультразвуковых диагностических устройствах?
15. Что такое ВАРУ в ультразвуковых диагностических устройствах и зачем применяется?
16. Есть ли физические ограничения на частоту следования импульсов в ультразвуковых диагностических устройствах?
17. Объяснить качественно принцип электронного сканирования диаграммой направленности антенной решеткой. Как повернуть луч на фиксированный угол?
18. Объяснить качественно принцип электронного сканирования диаграммой направленности антенной решеткой. Как сфокусировать луч на фиксированное расстояние?
19. Из-за чего формируются решеточные лепестки в диаграмме направленности антенной решетки?

20. Что такое В - режим в ультразвуковых диагностических устройствах? Принцип формирования ультразвукового изображения.
21. Что такое М - режим в ультразвуковых диагностических устройствах?
22. Где применяется А - режим?
23. Эффект Доплера. Формула для сдвига частоты в случае, когда приемный и излучающий преобразователи находятся рядом.
24. Как сохраняется информация о направлении кровотока в доплеровских измерителях?
25. Нарисовать качественно доплеровский спектр, получаемый при зондировании сосуда.
26. Характерные скорости кровотока в сосудах в фазах систолы и диастолы.
27. Объяснить качественно, как работают доплеровские измерители в импульсном режиме.
28. Чем определяется пространственное разрешение в доплеровских измерителях, работающих в непрерывном режиме?
29. Какие существуют физические ограничения на частоту следования импульсов в доплеровских измерителях?
30. Как оценить процесс нагрева биоткани в отсутствие теплоотвода?
31. Что такое гипертермия?
32. Какими механизмами определяется перенос тепла в биологических тканях? Как оценить время остывания нагретой области из-за теплопроводности?
33. Что такое процесс ультразвуковой хирургии?
34. Что такое мочекаменная болезнь? Что такое экстракорпоральная литотрипсия? Виды литотриптеров. Максимальное акустическое давление и характерная длительность импульсов литотриптеров.
35. От чего зависит прочность жидкостей? Что такое порог Блэйка? Как он зависит от радиуса пузырька?
36. Пузырёк как резонансная система: с чем связаны эффективные упругость и масса в этой системе? Как связана резонансная частота пузырька в воде с его размером?
37. Что такое механический индекс и как он характеризует безопасные уровни ультразвука?
38. Что такое ультразвуковые контрастные агенты? Для каких целей они используются?
39. Инерционный коллапс пузырьков. Какие процессы при этом происходят?
40. Что такое термический индекс? При каких значениях термического индекса использование ультразвука для диагностики считается безопасным? Как это связано с временем обследования?
41. Виды акустической кавитации, порог стабильной кавитации.
42. Порог инерционной кавитации.

### **Образцы задач для самостоятельного решения и контрольных работ**

Задача 1. В эхокардиографии необходимо получать акустические изображения лепестков митрального клапана сердца с разрешением не хуже 2 мм. Расстояние от грудной клетки до клапана примерно 7 см. Чтобы избежать чрезмерного поглощения, используется частота 2.25 МГц. Акустический путь между излучателем и сердцем занят мягкой тканью.

(а) Найти максимальную добротность преобразователя  $Q$ , которая обеспечивает требуемое разрешение.

(б) Рассчитать минимальный диаметр сфокусированного на клапан излучателя, который обеспечивает требуемое разрешение.

**Задача 2.** Нарисовать график угловой зависимости амплитуды волны в дальней зоне (т.е. диаграмму направленности) линейной решетки с периодом  $d=2$  мм, состоящей из 16-ти излучающих элементов-полос ширины  $a=1$  мм. Рабочая частота  $f=2.25$  МГц, среда – мягкая биологическая ткань. Считать известным, что отдельный элемент

имеет диаграмму направленности по амплитуде  $D_0(\alpha) = \sin\left(\frac{ka}{2} \sin \alpha\right) / \left(\frac{ka}{2} \sin \alpha\right)$ , где  $k$

– волновое число,  $\alpha$  - угол наблюдения (угол между направлением на наблюдателя и нормалью к поверхности излучателя). Рассчитать следующие три важные характеристики: (а) угловую ширину основного лепестка (в градусах), (б) углы (в градусах), соответствующие направлениям четырех младших решеточных лепестков (два - с одной стороны от основного лепестка, два – с другой), (в) отношение интенсивности в максимуме первого решеточного лепестка к интенсивности в максимуме основного лепестка.

**Задача 3.**

(1) Во время систолы (фазы сжатия сердца) скорость кровотока в артериях средних размеров увеличивается до пикового значения от 2 до 100 см/с. Оценить диапазон сдвигов частоты, измеряемых медицинскими доплеровскими измерителями скорости, работающих в непрерывном режиме. Лежат ли эти частоты в слышимом диапазоне?

(2) Артерия, в которой измеряется скорость кровотока, имеет диаметр, изменяющийся за 50 мс интервал времени во время систолы от 5 мм до 6 мм. Оценить поперечную скорость стенки артерии в этот интервал времени и рассчитать соответствующий доплеровский сдвиг. Попадает ли этот сдвиг в диапазон, соответствующий сдвигу частоты из-за кровотока (см. первую половину задачи)?

**Задача 4.** Рассчитать оптимальную частоту доплеровского измерителя скорости кровотока исходя из условия, что при заданной амплитуде посылаемой волны и заданной глубине залегания рассеивателя на приемник приходит максимальный рассеянный сигнал. Учесть, что размер эритроцитов много меньше длины волны и поэтому рассеяние происходит по закону Рэлея. Считать, что коэффициент затухания ультразвука в тканях прямо пропорционален частоте, причем на частоте 1 МГц коэффициент затухания равен  $0.1 \text{ см}^{-1}$ . Найти оптимальную частоту в двух случаях: (1) неглубокие артерии, лежащие на глубине 1 см; (2) сосуды, залегающие на глубине 5 см.

**Задача 5.** Фокальная перетяжка ультразвукового пучка имеет диаметр  $\delta_{\perp}=5$  мм. Оценить время  $t_0$  после начала излучения, в течение которого при расчете нагрева печени можно пренебречь эффектом теплопроводности. Теплоемкость печени  $C_v=3.4 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$ , коэффициент теплопроводности  $\kappa=4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(см}\cdot\text{град)}$ , плотность  $\rho=1.06 \text{ г/см}^3$ .

## 6.2. Шкала и критерии оценивания

## 7. Ресурсное обеспечение

Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная литература:

1. Хилл К., Бэмбер Дж., тер Хаар Г. Ультразвук в медицине. Физические основы и применения. – М.: Физматлит, 2008. Перевод с английского под ред. Л.Р. Гаврилова, В.А. Хохловой, О.А. Сапожникова, 539 с.

2. Гаврилов Л.Р. Фокусированный ультразвук высокой интенсивности в медицине. – М.: Фазис, 2013, 656 с.
3. Грегуш П. Звуковидение. М.: Мир, 1982.
4. Осипов Л.В. Ультразвуковые диагностические приборы. М.: Видар, 1999.

Дополнительная литература:

1. P. Wells. Biomedical ultrasonics. Academic Press, 1977.
  2. A. Briggs. Acoustic microscopy. Clarendon Press – Oxford, 1992.
- Kremkau F.W. Diagnostic Ultrasound. 6th ed. – Elsevier Science, 2002.

Периодическая литература

1. Бэйли М.Р., Хохлова В.А., Сапожников О.А., Каргл С.Г., Крам Л.А. Физические механизмы воздействия терапевтического ультразвука на биологическую ткань (обзор). – Акуст.ж., 2003, т.49, №4, с.437–464.

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

<http://acoustics.phys.msu.ru>, <http://limu.msu.ru>

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

**8. Язык преподавания:** русский, английский.