

Рабочая программа дисциплины

1. Название дисциплины: Ультразвук в медицине

2. Лекторы.

2.1. к.ф.-м.н., доцент Андреев Валерий Георгиевич, кафедра акустики, andreev@acs366.phys.msu.ru, тел. 939-29-52.

2.2. д.ф.-м.н., доцент Сапожников Олег Анатольевич, кафедра акустики, oleg@acs366.phys.msu.ru, тел. 939- 29-52.

3. Аннотация 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.

4. Цели освоения дисциплины.

Главная цель – узнать о том, как акустические волны используются в современной медицине для диагностики и терапии. Прослушав курс, студенты узнают об акустических свойствах биологических сред, о закономерностях распространения акустических волн в теле человека, об особенностях фокусировки, поглощения, рассеяния, и рефракции ультразвука в биотканях. Кроме того, слушатели познакомятся с принципами работы современных диагностических и терапевтических устройств, научатся рассчитывать характеристики излучаемых ими ультразвуковых полей, получат представление о современных разработках в этой области акустики.

5. Задачи дисциплины.

Задачами курса являются: (1) систематическое изложение физических основ применения акустических волн в медицине; (2) изложение современного состояния медицинской акустики; (3) знакомство с принципами работы конкретных устройств диагностики и терапии, использующихся в медицинской практике.

6. Компетенции.

6.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.

ПК-1, ПК-6

Предполагается, что слушатели владеют базовыми методами математической физики, знают основы акустики и волновой физики.

6.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.

ПК-3, ПК-4

Прослушавшие курс будут не только понимать принципы работы существующих ультразвуковых устройств, используемых в медицине, но и познакомятся с перспективными ультразвуковыми методами, которые могут найти клиническое применение в ближайшем будущем.

7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен знать акустические свойства биологических тканей и принципы работы существующих ультразвуковых устройств, используемых в медицине; уметь рассчитывать параметры ультразвуковых полей при их распространении в теле человека, знать основы безопасности при применении ультразвуковых устройств, уметь

рассчитывать параметры силового и теплового воздействия ультразвука на биологическую ткань.

8. Содержание и структура дисциплины.

| Вид работы | Семестр | | | Всего |
|---|---------|--|--|-------|
| | 7 | | | |
| Общая трудоёмкость, акад. часов | 36 | | | 36 |
| Аудиторная работа: | | | | |
| Лекции, акад. часов | | | | |
| Семинары, акад. часов | 36 | | | 36 |
| Лабораторные работы, акад. часов | | | | |
| Самостоятельная работа, акад. часов | | | | |
| Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен) | зач. | | | |

| N раздела | Наименование раздела | Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий | | Форма текущего контроля | |
|-----------|--|---|--|-------------------------|------------------------|
| | | Аудиторная работа | | | Самостоятельная работа |
| | | Семинары | | | |
| 1 | Краткая сводка свойств акустических волн, основные понятия и представления | <p><i>№1 (2 часа)</i> Интеграл Рэлея 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 прямоугольный поршневые излучатели. Ближнее и дальнее поля.</p> | | ДЗ, КР | |
| 2 | Источники ультразвука, применяемые в медицине | <p><i>№2 (2 часа)</i> 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.</p> | | ДЗ, КР | |
| 3 | Акустические свойства биологических тканей | <p><i>№3 (2 часа)</i> 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.</p> | | ДЗ, КР | |
| | | <p><i>№4 (2 часа)</i> Поглощение и рассеяние ультразвука в биологических тканях. Процессы релаксации. Основные механизмы поглощения. Рассеяние ультразвука в различных 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.</p> | | | |
| 4 | Эхо-импульсные методы визуализации | <p><i>№5 (2 часа)</i> 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.</p> | | ДЗ, КР | |
| | | <p><i>№6 (2 часа)</i> Ультразвуковая визуализация в режиме М. Ультразвуковая визуализация в режиме С. Применение УЗ визуализации в акушерстве, офтальмологии, исследовании внутренних органов.</p> | | | |
| 5 | Прочие методы визуализации | <p><i>№7 (2 часа)</i> Дифракционная томография. Акустическая голография. Акустическая микроскопия. Акустическая микроскопия.</p> | | ДЗ, КР | |
| | | <p><i>№8 (2 часа)</i></p> | | | |

| | | | | |
|----|--|--|--|--------|
| | | Методы неинвазивного измерения температуры среды | | |
| 6 | Диагностика сдвиговой упругости биологических тканей | №9 (2 часа) Визуализация, основанная на диагностике сдвигового модуля сред. Использование сдвиговых волн. | | ДЗ, КР |
| 7 | Эффект Доплера и принципы доплеровского измерения скорости кровотока | №10 (2 часа) Оценка скорости движения по доплеровскому сдвигу. Спектр доплеровского сигнала при непрерывном и импульсном зондировании. Доплеровский прибор непрерывного излучения. | | ДЗ, КР |
| | | №11 (2 часа) Импульсно-доплеровский измеритель скорости кровотока. Артефакты ультразвуковых изображений в доплеровском режиме. | | |
| 8 | Эффекты, сопровождающие распространение ультразвуковых волн в тканях, и их использование | №12 (2 часа) Тепловые эффекты, вызываемые ультразвуком. Физиологические основы ультразвуковой терапии. Ультразвук при лечении рака. Гипертермия опухолей. Хирургия с помощью высокоинтенсивного фокусированного ультразвука. | | ДЗ, КР |
| | | №13 (2 часа) 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. | | |
| 9 | Ударно-волновое разрушение биологических конкрементов | №14 (2 часа) Ударно-волновые источники: электромагнитные, электроразрядные, пьезоэлектрические, лазерные. Принцип экстракорпоральной литотрипсии. | | ДЗ, КР |
| | | №15 (2 часа) Устройство и параметры современных литотриптеров. Особенности фокусировки ударных импульсов. Механизмы разрушения почечных и желчных камней. | | |
| 10 | Принципы введения в медицинскую практику новых ультразвуковых методов | №16 (2 часа) Эксперименты <i>in vivo</i> и <i>in vitro</i> . 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. | | ДЗ, КР |
| 11 | Проблемы безопасности применений ультразвука в медицине | №17 (2 часа) Параметры ультразвука, характеризующие его безопасность в различных применениях. Оценка безопасности применения ультразвука в медицине. Измерение биологически эффективных экспозиций и доз. | | ДЗ, КР |
| 12 | Демонстрация ультразвукового сканера. | Демонстрация (1 час). Показ работы ультразвукового сканера. Обсуждение. (1 час) Заключительный коллоквиум. | | КР |

| | | | | |
|--|------------------------------|--|--|--|
| | Заключительный коллоквиум | | | |
|--|------------------------------|--|--|--|

Предусмотрены следующие формы текущего контроля успеваемости:

1. Домашнее задание (ДЗ);
2. Контрольная работа (КР).

9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО

1. Дисциплина является обязательной.
2. Вариативная часть, профессиональный блок, научно-исследовательский семинар.
3. Изложение опирается на знания, полученные студентами ранее в дисциплинах по математической физике и вводном курсе кафедры «Введение в акустику». Кроме того, имеется связь с отдельными темами параллельно читаемого курса «Теория волн» и «Теоретические основы акустики».

3.1. Дисциплины, которые должны быть освоены для начала освоения данной дисциплины:

Математический анализ, общие курсы физики

3.2. Дисциплины, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее:

Научно-исследовательская практика, научно-исследовательская работа.

10. Образовательные технологии

Изложение в основном ведётся традиционным способом (с использованием мела и доски). Отдельные закономерности распространения и рассеяния волн иллюстрируются с использованием компьютерного проектора. Кроме того, проводится физическая демонстрация работы современных ультразвуковых сканеров. Во время проведения коллоквиума проводится общая дискуссия по теме курса.

11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

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 (δ_L) такого излучателя?
6. Нарисовать качественно распределение амплитуды поля вдоль оси сферического излучателя с равномерным распределением амплитуды на его поверхности. Чем определяются продольное разрешение (δ_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 решетки. Как повернуть луч на фиксированный угол?
18. Объяснить качественно принцип электронного сканирования диаграммой направленности антенной решетки. 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 направ-

ленности по амплитуде $D_0(\alpha) = \sin\left(\frac{ka}{2} \sin \alpha\right) / \left(\frac{ka}{2} \sin \alpha\right)$, где k – волновое число, α – 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 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 $\rho=1.06 \text{ г/см}^3$.

12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

Основная литература:

1. Хилл К., Бэмбер Дж., тер Хаар Г. Ультразвук в медицине. Физические основы и применению - 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.

Интернет-ресурсы: <http://acoustics.phys.msu.ru>

13. Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Кафедральная аудитория.