

**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:

Генерация интенсивных звуковых волн (Generation of intense sound waves)

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 5 курсе в 10 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 10 семестре.

1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина «Генерация интенсивных звуковых волн» 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. Уметь рассчитывать параметры ультразвуковых полей при их распространении в теле человека и параметры силового и теплового воздействия ультразвука на биологическую ткань. 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).

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), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (ак.ч.)	В том числе					Самостоятельная работа обучающегося, академические часы	Форма текущего контроля успеваемости, наименование
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) <i>Виды контактной работы, академические часы¹</i>				Всего		
		Занятия лекционного типа (лекции)	Занятия семинарского типа					
	Семинары		Лабораторные занятия*	Практические занятия*				
<p>РАЗДЕЛ 1. Основные виды источников мощного звука. Пьезоэлектрические и магнитострикционные излучатели. в процессе акустической кавитации.</p> <p><i>Содержание темы (5 часов)</i> Основные виды источников мощного звука в технике и природе, механизмы преобразования энергии в звук. Характеристики источников звука: частотный спектр излучения, форма волны, интенсивность, уровень давления, диаграмма направленности, КПД. Пьезоэлектрические</p>	16	8				8	8	<i>Контрольная работа</i>

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

<p>материалы. Основные характеристики пьезоэлектриков. Коэффициент электромеханической связи. Сопротивление излучения. Предельные давления, создаваемые современными пьезоизлучателями. Магнитострикционный эффект и магнитострикционные материалы. Магнитострикционные источники: принцип действия и основные разновидности. Преимущества и недостатки по сравнению с пьезоэлектрическими источниками. Предельная механическая мощность.</p> <p>Семинары: Теория электромеханического преобразователя. Оптимизация преобразования электрической энергии в акустическую в пьезоэлектрическом преобразователе (1 час). Использование пьезокомпозитных и пьезополимерных материалов для улучшения характеристик источников и приемников ультразвука. (1 час). Магнитострикционные источники. Эквивалентная схема магнитострикционного излучателя. (2 часа). Расчет резонансной частоты и добротности излучателя. Расчет конического и экспоненциального концентраторов для частот 18 и 22 кГц. (1 час).</p>								
РАЗДЕЛ 2. Оптоакустические	18	8				8	10	<i>Контрольная работа</i>

<p>и электрогидравлические источники мощных акустических импульсов</p> <p><i>Содержание темы (5 часов)</i> Оптоакустические источники. Основные механизмы генерации звука оптическим излучением. Метод передаточных функций для описания теплового механизма преобразования «свет-звук». Лазерная генерация коротких акустических видеоимпульсов. Предельные давления, создаваемые оптоакустическими источниками. КПД преобразователя. Электроразрядные источники мощных импульсов. Физические процессы, происходящие при электрическом разряде в жидкости. Использование эллиптических рефлекторов для фокусировки акустических импульсов. Форма акустического импульса и его характерные параметры. Предельные давления. Использование электроразрядных источников в современной литотрипсии для разрушения почечных камней. Основные закономерности генерации акустических волн (грома) при ударе молнии. Физические принципы работы электромагнитных источников мощных импульсов. Конструкции излучателей с линзами и рефлекторами. Выбор материалов для источников. Форма акустического импульса и его</p>								
--	--	--	--	--	--	--	--	--

<p>характерные параметры. Предельные давления. Использование электромагнитных источников в современной литотрипсии для разрушения почечных камней. Основные закономерности генерации акустических волн (грома) при ударе молнии. Молния как распределенный источник акустических волн. Частота и длительность грома. Диаграмма направленности при различных атмосферных условиях.</p> <p>Семинары: Оптоакустический механизм генерации звука. Генерация мощных импульсов. Расчет профиля импульса и пикового давления. (2 часа). Электроразрядные и электромагнитные источники мощных акустических импульсов. Физические процессы, происходящие при электрическом разряде в жидкости. Расчет профиля импульса и пикового давления. (2 часа). Молния как распределенный источник акустических волн. Расчет длительности грома и уровней давления в различных атмосферных условиях. (1 час).</p>								
<p>РАЗДЕЛ 3. Сверхзвуковые источники и генерация волны звукового удара.</p> <p>Содержание темы (3 часа) Генерация акустических волн большой амплитуды сверхзвуковыми источниками. Волна звукового удара: ее</p>	14	6				6	8	<i>Контрольная работа</i>

<p>параметры и особенности нелинейного распространения в атмосфере. Возбуждение звука движущимся объемным источником. Волновой резонанс. Генерация звука сверхзвуковой струей. Газоструйные и гидродинамические излучатели: свистки, генератор Гартмана, сирены.</p> <p>Семинары: Генерация волны звукового удара в воздухе. Распространение ударной волны в воздухе. (2 часа) Частотный диапазон газоструйных генераторов и максимальные интенсивности звука. Зависимости акустической мощности от параметров струи. (1 час)</p>								
<p>РАЗДЕЛ 4. Взрывные источники</p> <p>Содержание темы (2 часа) Взрывные источники. Основные сведения о взрывчатых веществах. Ударная адиабата. Детонационная волна. Параметры ударной волны, возникающей при взрыве. Сильный взрыв (модель взрыва атомной бомбы). Автомодельное решение распространения волны сильного взрыва. Генерация мощных сейсмических волн при подземных взрывах.</p> <p>Семинары: Физика взрыва. Особенности генерации ударных волн при</p>	12	6				6	6	<i>Контрольная работа</i>

умеренном и сильном (атомном) взрывах. Взрывы в атмосфере и под землей. (2 часа)									
<p>РАЗДЕЛ 5. Фокусировка как способ получения высокоинтенсивного акустического излучения.</p> <p><i>Содержание темы (5 часов)</i> Фокусировка как способ получения высокоинтенсивного акустического излучения. Нелинейные эффекты при фокусировке акустических пучков. Нелинейная рефракция и нелинейное насыщение. Самофокусировка и самодифракция. Сдвиг фокуса и уширение фокальной перетяжки. Эффект нелинейного насыщения. Предельные возможности усиления амплитуды волны при фокусировке.</p> <p><i>Семинары:</i> Акустические линзы и зеркала. Фокусировка линейных волновых пучков. (1 час) Компрессия волн как фокусировка во времени. Усиление волн при временной компрессии. Метод обращения времени и волнового фронта при фокусировке волн в неоднородной среде. "Ультразвуковая базука". (1 час)</p>	9	6				6	3	<i>Контрольная работа</i>	
Промежуточная аттестация _зачёт_	3							3	<i>Зачёт</i>
Итого	72	34						38	

*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 «Генерация интенсивных звуковых волн»

1. Основные виды источников мощного звука в технике и природе, механизмы преобразования энергии в звук.
2. Уравнения для связи электрической напряженности поля в пьезокерамике с механической деформацией.
3. Эквивалентная схема пьезоэлектрического излучателя. Резонансная частота и добротность излучателя.
4. Коэффициент электромеханической связи. Сопротивление излучения.
5. Предельные давления, создаваемые современными пьезоизлучателями.
6. Принцип действия магнитострикционных излучателей. Их основные разновидности.
7. Эквивалентная схема магнитострикционного излучателя. Резонансная частота и добротность излучателя.
8. Виды концентраторов излучения. Формулы усиления по амплитуде для концентраторов .
9. Оптоакустическая генерация генерации звука. Генерация мощных импульсов.
10. Вид профиля импульса для случая жесткой и мягкой границы
11. Тепловой и пробойный механизмы генерации акустических импульсов.
12. КПД оптоакустического преобразователя.
13. Электроразрядные источники мощных импульсов. Физические процессы, происходящие при электрическом разряде в жидкости.
14. Принцип действия и схема эллиптических рефлекторов для фокусировки акустических импульсов.
15. Форма акустического импульса и его характерные параметры. Предельные давления.
16. Использование электроразрядных источников в современной литотрипсии для разрушения почечных камней.
17. Сформулировать основные закономерности генерации акустических волн (грома) при ударе молнии.
18. Механизм генерации акустических волн большой амплитуды сверхзвуковыми источниками.
19. Волна звукового удара: ее параметры и особенности нелинейного распространения в атмосфере.
20. Возбуждение звука движущимся объемным источником. Волновой резонанс.
21. Генерация звука сверхзвуковой струей. Газоструйные и гидродинамические излучатели: свистки.
22. Генератор Гартмана, сирены.
23. Взрывные источники. Виды взрывчатых веществах и их свойства.
24. Ударная адиабата. Детонационная волна.
25. Параметры ударной волны, возникающей при взрыве.
26. Сильный взрыв (модель взрыва атомной бомбы). Автомодельное решение распространения волны сильного взрыва.
27. Генерация мощных сейсмических волн при подземных взрывах.
28. Акустические линзы и рефлекторы.

29. Нелинейные эффекты при фокусировке акустических пучков. Нелинейная рефракция и нелинейное насыщение.
30. Самофокусировка и самодефокусировка интенсивных волн. Сдвиг фокуса и уширение фокальной перетяжки.
31. Эффект нелинейного насыщения. Предельные возможности усиления амплитуды волны при фокусировке.

Образцы задач для самостоятельного решения

Задача 1. Рассчитать амплитуду смещения торца стержневого излучателя, изготовленного из никеля и работающего на 1-й резонансной частоте 8 кГц. Считать, что относительная деформация стержня зависит от напряженности поля H по закону $\varepsilon = 5 \times 10^{-6} \times H$ [кА/м], а амплитуда напряженности магнитного поля $H = 100$ А/м.

Задача 2. В среде 1, характеризующейся скоростью звука c_1 и плотностью ρ_1 , пьезоэлектрический источник излучает плоскую гармоническую акустическую волну с циклической частотой ω . Эта волна падает перпендикулярно на плоскую границу раздела со средой 2, характеризующейся скоростью звука c_2 и плотностью ρ_2 . Для акустического согласования двух сред между ними введён плоскопараллельный слой толщины d из материала со скоростью звука c_0 и плотностью ρ_0 . Исходя из уравнений линейной акустики, вывести коэффициенты отражения R_p и прохождения T_p по давлению в зависимости от толщины d . При каком условии отражение отсутствует?

Задача 3. Источники электрической мощности, использующиеся для возбуждения пьезоэлектрических излучателей, можно представить в виде э.д.с. E с внутренним сопротивлением R_0 (обычно $R_0 = 50$ Ом). При подсоединении к пьезоизлучателю выход источника оказывается нагруженным на электрический импеданс Z . Как зависит подаваемая на пьезоизлучатель электрическая мощность от величины Z ? При каком Z эта мощность максимальна?

Задача 4. Военный истребитель пролетает над наблюдателем в горизонтальном направлении со скоростью $V = 2000$ км/ч на высоте 500 м. Скорость звука в воздухе $c_0 = 340$ м/с. Сколько времени пройдёт с момента пролёта самолёта над наблюдателем до момента прихода волны звукового удара?

Задача 5. Гауссовский пучок радиуса $a = 30$ мм сфокусирован в точку, расположенную на расстоянии от источника $F = 100$ мм. Каким будет радиус фокальной перетяжки на частоте 100 кГц при распространении в воде (скорость звука $c_0 = 1500$ м/с) и в воздухе (скорость звука $c_0 = 340$ м/с)?

6.2. Шкала и критерии оценивания

7. Ресурсное обеспечение

Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная литература:

1. Римский-Корсаков А.В. Электроакустика. – М.: Связь, 1973.

2. Кайно Г. Акустические волны. – М.: Мир, 1990.
3. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. – М.: ЛЕНАНД: URSS, 2019.
4. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. – М.: Наука, 1984.
5. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Сов. Энциклопедия, 1980.
6. Физическая акустика (под ред. У. Мэсона). – М.: Мир, 1966–1978.
7. Бергман Л. Ультразвук. – М.: ИЛ, 1956.
8. Глозман И.А. Пьезокерамика. – М.: Энергия, 1972.
9. Источники мощного ультразвука (под ред. Л.Д. Розенберга). – М.: Наука, 1967.
10. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971.
11. Коул Р. Подводные взрывы. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1950.
12. Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев Н.Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. – М.: МГУ, 1990.
13. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.: Янус-К, 1996.
14. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. – М.: Наука, 1991.
15. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. – М.: Наука, 1966.
16. Фью А. Гром. // УФН, т.119, вып.4, 1976, с. 735–748.
17. Каневский И.Н. Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн. – М.: Наука, 1977.

Дополнительная литература:

1. Жаров В.П., Летохов В.С. Лазерная оптоакустическая спектроскопия. – М.: Наука, 1984.
2. Лямшев Л.М. Применение лазеров в акустике. – ЦНИИ «РУМБ», 1986.
3. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.: Янус-К, 1996.

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.
2. D. Cathignol. High intensity piezoelectric sources for medical applications: Technical aspects. – Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21st Century, ed. by O.V. Rudenko and O.A. Sapozhnikov (Faculty of Physics, MSU, Moscow, 2002), vol.1, pp.371–378.
3. Бункин Ф.В., Комиссаров В.М. Акустический журнал, 1973, т.19, №3, с.305.

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.