Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт Цифрового развития
Кафедра Инфокоммуникаций

Утверждена распоряжением по физико-техническому факультету
от _____ № _____
Выполнена по заявке организации (предприятия) _____
_____

Допущен к защите
«__» _____ 2023 г.
И. о. зав. кафедрой инфокомуникаций доктор техн. наук. профессор
_____ Линец Г.И.
подпись, инициалы, фамилия
"__" _____ 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

«Исследование электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках**»**

Рецензенты:
Закинян Роберт Гургенович
(Ф. И.О.)
доктор физ. мат. наук професор кафедры теоретической и математической физики
_____
(ученая степень, звание, должность)

Нормоконтролер:
Лапин Алексей Алексеевич
(Ф. И.О.)
профессор кафедры инфокоммуникаций
(ученая степень, звание, должность)
_____
Подпись

Дата зашиты
«__» _____ 2023 г
Оценка_____

Выполнил:
Прасолов Аркадий Владимирович
(Ф. И.О.)
Студент 2 курса,
группы ЭНЭ-м-о-21-1
Направления подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника
Направленность (профиль) «Физическая электроника»
очной формы обучения
_____
(Подпись)

Руководитель:
Гривенная Наталья Владимировна
(Ф. И.О.)
Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инфокоммуникаций
(ученая степень, звание, должность)
_____
подпись

Ставрополь, 2023 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цифрового развития
Кафедра инфокоммуникаций

Утверждена распоряжением по инженерному институту
от_____№ _____
Выполнена по заявке организации (предприятия) _____
_____

Допущен к защите
«__» _____ 2023 г.
И. о. зав. кафедрой инфокомуникаций доктор техн. наук. профессор
_____ Линец Г.И.
подпись, инициалы, фамилия
"__" _____ 2023 г.

.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ (ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ) НА ТЕМУ:

«Исследование электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках»

Автор дипломного проекта_____Прасолов Аркадий Владимирович
(подпись) фамилия, имя, отчество
Направление подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника
Направленность (профиль) «Физическая электроника»
Группа ЭНЭ-м-о-21-1
Руководитель проекта _____ Наталья Владимировна Гривенная
(подпись, дата) имя, отчество, фамилия
Консультанты по разделам:
1 Литературный обзор _____ Н. В Гривенная
наименование раздела подпись, инициалы, фамилия
2 Экспериментальный раздел _____ Н. В Гривенная
наименование раздела подпись, инициалы, фамилия
3 Обсуждение результатов _____ Н. В Гривенная
наименование раздела подпись, инициалы, фамилия
4 Безопасность и экологичность работы _____ Ю. А Ларионов
наименование раздела подпись, инициалы, фамилия
5 Организационно-экономический раздел _____ Е. А Бондаренко
наименование раздела подпись, инициалы, фамилия
Нормоконтролер _____ А. А Лапин
подпись, инициалы, фамилия

Ставрополь, 2023 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Кавказский федеральный университет»

Институт цифрового развития
Кафедра инфокоммуникаций
Специальность 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника »
Направленность (профиль) «Физическая электроника»

«УТВЕРЖДАЮ»
И. о. зав. кафедрой
инфокомуникаций доктор техн. наук. профессор
Линец Г.И.
подпись, инициалы, фамилия
"__" _____ 2023 г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ (ДИПЛОМНУЮ РАБОТУ)

Студент Прасолов Аркадий Владимирович группа ЭНЭ-м-о-21-1
фамилия, имя, отчество

1. Тема «Исследование электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках».

Утверждена распоряжением по факультету № _____от «___» _____2023 г.

2. Срок представления работы к защите "«___» _____ 2023 г.
3. Исходные данные для выполнения работы результаты преддипломной практики
4. Содержание пояснительной записки:

4.1 Литературный обзор
4.2 Экспериментальный раздел
4.3 Обсуждение результатов
4.4 Безопасность и экологичность работы
4.5 Организационно-экономический раздел
4.6 Другие разделы работы
5 Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей) _
Дата выдачи задания
Руководитель дипломной работы Наталья Владимировна Гривенная
подпись имя, отчество, фамилия
Консультанты по литературному разделу Н. В Гривенная
подпись инициалы, фамилия
по экспериментальному разделу Н. В Гривенная
подпись инициалы, фамилия
по разделу обсуждение результатов Н. В Гривенная
подпись инициалы, фамилия
по безопасности и экологичности работы Ю. А Ларионов
подпись инициалы, фамилия
по организационно-экономическому разделу Е. А Бондаренко
Задание к исполнению принял «__» _____2023 г. _____
Подпись инициалы, фамилия

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цифрового развития
Кафедра инофокоммуникаций
Специальность 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника »
Направленность (профиль) «Физическая электроника»

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Фамилия, имя, отчество (полностью) Прасолов Аркадий Владимирович
Тема ВКР «Исследование электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках».
Руководитель Гривенная Наталья Владимировна
Консультанты: Гривенная Наталья Владимировна, Ларионов Юрий Анатольевич, Бондаренко Евгений Алексеевич

№	Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения работы	Примечание
1	Литературный обзор	12.04.2021 – 30.04.2021	
2	Экспериментальный раздел	03.05.2021 – 14.05.2021	
3	Обсуждение результатов	15.05.2021 – 31.05.2021	
4	Безопасность и экологичность работы	01.06.2021 – 17.06.2021	
5	Организационно экономический раздел	01.06.2021 – 17.06.2021	

Руководитель _____ Гривенная Наталья Владимировна
подпись. Ф.И.О.
и. о. зав. кафедрой инфокоммуникаций _____ Линец Геннадий Иванович
подпись. Ф.И.О.
«___»_____ 2023 г.

Оглавлени

e

Введение.....6

1 Литературно-патентный обзор. Анализ литературных источников по тематике работы.....9

1.1 Понятие и сущность электромагнитных резонансных явлений.....9

1.2 Определение и особенности акустических резонансных явлений….16

1.3 Основы исследований электромагнитных и акустических резонансных явлений.....17

2 Практическая реализация исследования электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках.....26

2.1 Исходные данные исследования.....26

2.2 Процесс и результаты исследования электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках.....27

2.3 Моделирование электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках и формирование выводов.....37

Заключение.....72

Список использованных источников.....73

Введение

Актуальность. Тонкие пленки как объект исследования представляют собой системы, которые обладают уникальными оптическими, магнитными, механическими и электронными свойствами по сравнению с иными материалами. Исследование электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках имеет значимость не только как фундаментальное направление в физике тонких пленок, но и как перспективное направление в нанотехнологии и материаловедении. В настоящее время разрабатываются новые методы для управления такими явлениями, которые могут привести к новым типам элементов управления в сферах, где нужна усиленная светодинамика и ньютоновская оптика. Изучение этих явлений на уровне тонких пленок позволяет изолировать интересующие нас свойства, что делает их релевантными для широкого спектра исследований.

Исследование акустических резонансных явлений в тонких пленках имеет особую актуальность, т. к. позволяет изучать механические свойства и динамику тонких пленок, а также их эффекты. Это может быть полезно для создания устройств на основе акустических резонаторов, таких как фильтры, усилители и генераторы смещения частоты, а также для улучшения различных типов биомедицинских и других приборов. Таким образом, электромагнитные и акустические резонансные явления в тонких пленках имеют высокую научную и техническую значимость, т. к. могут привести к созданию новых инновационных материалов и технологий для электроники, фотоники, акустики, оптики и других областей науки и промышленности.

Цель – исследование теоретических аспектов и реализация практического исследования электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках.

Объект – тонкие пленки.

Предмет – электромагнитные и акустические резонансные явления в тонких пленках.

Задачи:

- рассмотреть теоретические особенности электромагнитных и акустических резонансных явлений;

- представить основы исследований электромагнитных и акустических резонансных явлений

- реализовать исследование электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках;

- смоделировать электромагнитные и акустические резонансные явления в тонких пленках и сформировать выводы.

Теоретическая изученность представлена анализом научных трудов отечественных и зарубежных исследователей. Так, в элементарном учебнике физики Ландсберга Г.С. освещается теория колебаний и волн. Красильников В.А. рассматривает теорию акустических колебаний и резонансных явлений в различных средах. Данилов О.Е. описывает демонстрационный эксперимент по изучению полей методом компьютерного сканирования, что позволяет визуализировать акустические резонансы в тонких пленках. Широносов В.Г. исследует различные типы резонансных явлений, включая электромагнитные и акустические, обнаруживаемые в разных объектах. Левин А.И. в своей работе по теоретическим основам электрохимии рассказывает о физических основах резонанса и его использовании в различных областях науки и техники. Саласюк А.С. описывает резонансные акустические эффекты в тонких пленках, что может быть полезно для создания новых акустических устройств и технологий. Харланов А.В. исследует пространственно-временной резонанс и взаимодействие электромагнитных и акустических волн в тонких пленках, а также влияние электромагнитной волны на акустические колебания одномерной системы. Изотов А.В. рассматривает исследование восприимчивости и неоднородностей тонких пленок. Колесников В.Г. и Древаль Н.В. исследуют применение комбинированного воздействия электромагнитных и акустических волн для выявления резонансных частот, что может иметь

применение в различных областях. Карпачев С.Н., Власов В.С., Котов Л.Н. исследуют нелинейную динамику магнитной и упругой подсистем тонкой пленки вблизи акустического резонанса, что имеет значение для разработки новых материалов и технологий для электроники и магнитной техники. Исследование опыта авторов актуально в рамках настоящей работы.

Структура работы представлена введением, основной частью из двух глав, заключением, списком использованных источников и приложением. В основе Главы 1 «Теоретические аспекты исследований электромагнитных и акустических резонансных явлений» заложено понятие и сущность электромагнитных резонансных явлений, определение и особенности акустических резонансных явлений, основы исследований электромагнитных и акустических резонансных явлений. В Главе 2 «Практическая реализация исследования электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках» представлены исходные данные исследования, процесс и результаты исследования электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках, моделирование электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках и формирование выводов.

1 Литературно-патентный обзор. Анализ литературных источников по тематике работы

1.1 Понятие и сущность электромагнитных резонансных явлений

Тонкие пленки – тонкие слои материала, толщина которых находится в диапазоне от долей нанометра (моноатомного слоя) до нескольких микрон [8]. Они играют значимую роль в научно-технических приложениях в различных междисциплинарных областях. Тонкие пленки могут быть твердыми или жидкими (реже — газообразными). Состав, структура и свойства тонких пленок могут отличаться от таковых для объемной фазы, из которой образовалась тонкая пленка. Жидкие тонкие пленки разделяют газообразную дисперсную фазу в пенах и жидкие фазы в эмульсиях. В отличие от твердых пленок, жидкие тонкие пленки могут возникать самопроизвольно. Простота создания жидких пленок является их преимуществом перед твердыми пленками. Тонкие пленки используются как в качестве покрытий и систем охлаждения, так и в качестве составных частей электронных устройств, так как специфические физические явления, характерные только для тонких структур, оказываются полезными в таких приборах. При этом в электронике практически не используются сферические тонкие пленки, несмотря на простоту их получения. Поэтому экспериментальные и теоретические исследования о взаимодействии физических полей в сферических тонких пленках можно найти только в области воздействия физических факторов на органические тонкие пленки (клеточные мембраны).

С другой стороны, с точки зрения биоэлектроники, т. е. использования биологических материалов и объектов при создании электронных устройств, полезно знать механизмы влияния внешних факторов (например, электромагнитных волн) на эти объекты. В данной работе рассматриваются ньютоновские черные пленки (толщиной порядка микрон), которые могут быть созданы как искусственно, так и являются основой любых биологических мембран. С физической точки зрения не имеет значение происхождение этой пленки. Таким образом, полученные результаты можно с одинаковым успехом применять и в биоэлектронике, и в физической электронике. Поэтому для понимания вопроса эффективного применения тонких пленок в электронике полезно знать информацию о воздействии электромагнитных волн на органические тонкие пленки. Такому воздействию посвящено много работ. Их анализ нужен для понимания общих моментов взаимодействия электромагнитных волн с тонкими пленками.

Математические модели механизма воздействия электромагнитных полей на биологические объекты в основном затрагивают субклеточный и клеточный уровни (например [1-5]). Воздействию электромагнитных полей на органном, организменном и других уровнях в основном посвящены экспериментальные работы [6-8].

Что касается исследования акустических колебаний, то работы, посвященные этой теме, носят дискуссионный и качественный характер [1]. Авторы не строят модель воздействия электромагнитного излучения нетепловой интенсивности на функционирование биологических объектов и не оценивают его, а предлагают наиболее вероятные механизмы этого воздействия.

В работе [2] выдвигается предположение о связи электромагнитного воздействия с электромеханическими колебаниями клеточных структур, затухание которых компенсируется энергией метаболизма. Такими структурами могут быть, в частности, элементы клеточных мембран (тонкие

пленки). При скорости звука в мембране $10^2 – 10^3$ м/с и характерном размере 0,01 мкм частоты упругих колебаний элементов мембран лежат в интервале $10^9 – 10^{11}$ Гц.

Исходным является предположение, что в живом организме и при отсутствии внешнего воздействия все или некоторая часть колебательных степеней свободы определенных биологических структур находятся в режиме автоколебаний, поддерживаемом энергией метаболизма. Действие внешнего электромагнитного излучения связано не с возбуждением автоколебаний в биоструктурах, а с изменением тех или иных характеристик уже существующих в живом организме автоколебаний, в частности, с изменением их спектра.

Любая биоструктура (молекулы белка, участки клеточных мембран и т. п.) представляет собой, с колебательной точки зрения, нелинейную систему с большим числом степеней свободы. Временные и спектральные характеристики авто-

колебаний в таких системах, как и их реакции на внешнее воздействие, могут быть весьма сложными и разнообразными. Чтобы разобраться в закономерностях такого воздействия, целесообразно, по возможности, исходить из простых моделей. Авторы [2] допускают, что автоколебания на СВЧ возникают в участках липидного остова мембраны, отделенных друг от друга крупными белковыми молекулами. Таких участков на всей поверхности мембраны, площадь которой для одной клетки составляет несколько квадратных микрон, может быть множество. Близким по структуре участкам мембран данной клетки или соседних с ней идентичных клеток соответствуют наборы нормальных колебаний с почти идентичным спектром.

Поскольку различные участки мембран взаимодействуют между собой (в частности, благодаря значительным дипольным электрическим моментам), между нормальными колебаниями с близкими частотами существует слабая связь. Простейшей моделью такой структуры может

служить совокупность большого числа элементарных автогенераторов (осцилляторов), слабо связанных между собой. Всю совокупность можно разбить на несколько групп, в каждой из которых, соответствующей одному из нормальных колебаний, автогенераторы почти идентичны. Взаимодействие между автогенераторами различных групп, если их частоты не находятся в рациональном отношении друг к другу, пренебрежимо мало. В пределах каждой группы отдельные автогенераторы либо колеблются независимо друг от друга, если связь между ними слаба, а расстройка их собственных частот слишком велика, либо, при достаточно близких частотах автоколебаний, имеет место их взаимная синхронизация. В первом случае фазы колебаний различных осцилляторов распределены хаотически между $-\pi$ и $+\pi$, так что среднее значение суммы фаз всех автоколебаний близка к нулю. Во втором случае можно выделить два основных режима – синфазный, при котором все взаимно синхронизированные автогенераторы колеблются с одной частотой синфазно, и противофазный, при котором частоты автоколебаний также одинаковы, а фазы колебаний большинства автогенераторов распределены между $-\pi$ и $+\pi$ более или менее равномерно, так что сумма всех фаз близка к нулю. Установление того или иного из этих режимов зависит от степени идентичности автогенераторов, их нелинейных характеристик и типа связи между ними. Как правило, при взаимной синхронизации большого числа слегка различающихся межу собой автогенераторов устанавливается противофазный режим.

С другой стороны, взаимной синхронизации автоколебаний отдельных элементов структуры препятствует быстрое ослабление с расстоянием связей между элементами, что приводит к локализации синхронных режимов в небольших участках структуры (т. н. «кластерах»), между которыми синхронизация отсутствует.

Таким образом, как в отсутствии, так и при наличии взаимной синхронизации, автоколебания в различных участках структуры происходят так, что среднее значение суммы фаз всех автоколебаний близко к нулю.

Соответственно близок к нулю и макроскопический – средний по большому числу однотипных участков эффект таких колебаний – они оказывают минимальное воздействие на другие клеточные структуры.

Ситуация, однако, может существенно измениться при воздействии на клетки внешнего электромагнитного поля. Если частота внешнего воздействия приблизится достаточно близко к частоте автоколебаний одной из упомянутых групп почти идентичных осцилляторов, произойдет «захват» (синхронизация) автоколебаний внешним сигналом. Центр полосы синхронизации определяется средневзвешенной величиной парциальных частот осцилляторов данной группы и мало зависит от отклонений парциальных частот отдельных осцилляторов. Если система связанных осцилляторов имеет несколько устойчивых автоколебательных состояний с различными частотами, то слабый внешний сигнал может синхронизировать автоколебания на нескольких близких частотах.

Синхронизация сопровождается фазировкой колебаний всех элементарных автогенераторов – фазы этих колебаний будут совпадать с фазой внешнего сигнала в данном участке структуры. Такие синфазные колебания идентичных участков клеточных мембран могут приводить к различным макроскопическим эффектам (например, к возбуждению электромагнитных или электроакустических волн в окружающей среде) и служить информационным сигналом для регуляторных систем организма.

Для любой из упомянутых выше групп автогенераторов может существовать целый набор резонансных частот, на которых воздействие внешнего сигнала приводит к одному и тому же или близким биологическим эффектам. Поскольку другие биоструктуры или структурно отличные участки мембран имеют свой спектр автоколебаний, могут наблюдаться и другие наборы частот, на которых внешний сигнал вызывает иные биологические эффекты. Аналогичная ситуация может иметь место при синхронизации на гармониках или субгармониках частот автоколебаний.

Характерной особенностью явления синхронизации автоколебаний является малая мощность требуемого для синхронизации внешнего сигнала, пороговое значение которого зависит от уровня шумов в системе и разброса парциальных частот отдельных автогенераторов. Для реальных биологических объектов величина порога зависит и от глубины расположения резонирующих структур относительно поверхности, подвергаемой электромагнитному облучению, и от интенсивности поглощения электромагнитных волн в приповерхностно расположенных тканях. Увеличение мощности внешнего сигнала над порогом не вносит качественных изменений в характер синхронизированных колебаний.

Хотя синхронизация – не единственный эффект, которым может сопровождаться воздействие внешнего гармонического сигнала на сложную автоколебательную систему, в [3] предполагается, что именно синхронизация наиболее естественно объясняет резонансное действие СВЧ излучения на живые объекты.

Фазировка колебаний при синхронизации может, по-видимому, сопровождаться конформационными перестройками клеточных структур, например, отдельных участков мембран, так как автоколебания могут влиять на устойчивость конформаций последних подобно тому, как это имеет место для механических систем.

В [4,5] была выдвинута теория, в которой предполагалось, что биологический эффект (т. е. максимальный отклик тонкой пленки на внешнее воздействие), вызванный воздействием электромагнитного излучения на биологический объект, связан непосредственно с акустическими колебаниями, возбуждаемыми этим излучением, т. е. этот эффект возникает тогда, когда электромагнитное излучение вызывает в мембране акустические колебания, длина волны которых укладывается по периметру мембраны целое число раз. Такое предположение оказалось в хорошем соответствии с теорией (см. напр. 8]).

Классическим для радиотехники приемом исследования является

изучение спектров поглощения или излучения исследуемого объекта. Из-за большого поглощения энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) в биологических средах, а так же очень малой плотности когерентных излучений снятие спектров обычными радиотехническими методами практически неосуществимо. Поэтому объектом изучения явились так называемые спектры действия – зависимость биологического эффекта действия от частоты колебаний. Исследование этих спектров было проведено в [7] исходя из предположения, что наблюдаемые частотные зависимости определяются акустическими колебаниями, возбуждаемыми в мембранах: плазматической, ядра, митохондрий и т. д. А поскольку мембраны поляризованы, то возбуждение акустических колебаний связано с одновременным возбуждением электрических колебаний, длина волны которых совпадает с акустическими – то есть с возбуждением в мембранах акустоэлектрических колебаний и волн. Расчет, исходящий из указанного предположения, привел к количественным результатам, удовлетворительно совпадающим с экспериментом для всех исследовавшихся спектров действия. Одним из важных выводов из этого расчета явился вывод о том, что длина волны в мембране для средней частоты миллиметрового диапазона имеет порядок 100 Å. Виды возбуждаемых в мембране колебаний отличаются друг от друга числом длин волн, укладывающихся на периметре (отличается друг от друга на единицу). Вид колебаний определяет характер распределения сил электромагнитного и акустического полей у поверхности мембраны. Число возможных видов колебаний для различных клеток может доходить до нескольких десятков тысяч. Каждому виду колебаний соответствует, по-видимому, свой сигнал управления (своя частота колебаний), хотя, судя по спектрам действия, отличия в действии между ближайшими видами обычно незначительны.

В [6] обращают внимание на тот факт, что акустоэлектрические колебания и волны (это такие колебания и волны, в которых, в отличие от электромагнитных колебаний и волн, энергия электрического поля

превращается в энергию упругих деформаций и наоборот) играют особенно важную роль в функционировании живых тонких пленок.

1.2 Определение и особенности акустических резонансных явлений

Одной из важных задач при отыскании новых принципов, служащих для построения новых электронных приборов, является задача нахождения способов возбуждения акустических колебаний систем внешней электромагнитной волной.

Основная сложность возбуждения акустических колебаний посредством электромагнитных волн состоит в том, что скорости их распространения отличаются на несколько порядков. При возбуждении колебаний, зависящих не только от времени, но и от координат, возникает вопрос: будет ли резонанс носить только временной характер (то есть зависеть от частоты вынуждающей силы), или будет иметь значение и пространственный фактор (распределение силы по координатам).

В физической электронике в основном рассматриваются твердотельные тонкие пленки. В Европе существует Виртуальный институт по нанопленкам (VINF), который создан для объединения ученых, работающих с тонкими пленками. Рассмотрение физических процессов, проходящих в тонких пленках, полезно с точки зрения миниатюризации электронных приборов и их компонентов. Жидкие тонкие пленки изучаются или с точки зрения охлаждающих систем, или с точки зрения биоэлектронки (тонкая пленка как основа биологической мембраны). Лидером в этом направлении являются США, Германия, Япония и Израиль. В России это направление практически не развито, а подобные вопросы рассматриваются наноэлектроникой [2, 8].

Одним из пионеров акустоэлектроники является академик Гуляев Ю.В. О существовании акустоэлектрических колебаний биологической клетки

впервые было заявлено Фрелихом Г. (Fröhlich H.) [9]. В нашей стране большая плеяда ученых рассматривала влияние электромагнитных волн на биологические объекты (Девятков Н. Д., Пресман А. С., Бецкий О. В. и др.) [10 – 16]. О возможной роли акустических колебаний плазматических мембран писал Голант М. Б. Недавно существование акустических колебаний клеток плесени было экспериментально обнаружено в Калифорнийском университете (Pelling A. E., Sehati S., Gralla E. B., Valentine J. S., Gimzewski J. K.) [17], также акустические колебания рассматривались в Чешской Академии Наук (Cifra M., Pokorný J.) [8].

1.3 Основы исследований электромагнитных и акустических резонансных явлений

В настоящее время моделям органической тонкой пленки (клетки) и влиянию на нее электромагнитного излучения низкой интенсивности посвящено небольшое количество работ.

В [6] на основе расчетных и экспериментальных данных рассмотрены эквивалентные схемы замещения клеточной мембраны, клетки и клетки с учетом межклеточной среды. Проведен анализ характеристических уравнений и частотных характеристик эквивалентных схем замещения. Авторы рассматривают эквивалентные схемы замещения клеточных структур, предложенные разными учеными, в частности, Чайлахяном Л. М., Пресманом А. С. и др. Клеточная мембрана, протоплазма и межклеточная жидкость представлены в виде различных соединений емкостных, индуктивных и резистивных элементов.

Предложенные модели клеточных структур, анализируемые в [36], результаты расчета их параметров и анализа частотных характеристик наиболее адекватно, по мнению авторов, отражают электрические процессы, происходящие в мембранах и клетках, по сравнению с другими известными моделями. Однако приведенные результаты показывают внутренние процессы клеточных структур как бы в «статике» и без учета действующих

внешних электрических и магнитных полей.

В [7] рассмотрены физические свойства биоклетки, на основе которых построена ее модель, учитывающая внешние воздействия на биоклетку. Основное внимание авторы уделяют лечению больных клеток в зависимости от дозы химического (лекарства), радиационного (α,β и γизлучение) и электромагнитного воз действий. Основным интегральным параметром при этом является положительный либо отрицательный эффект (выздоровление либо гибель клетки) в зависимости от вводимой дозы.

При построении модели использовался метод «черного ящика», то есть моделирование клетки производится, не вникая в ее сложные физикохимические процессы, а используя только функциональные свойства, заведомо хорошо изученные.

Модель биоклетки состоит из ядра, выполняющего функции обработки ин формационного сигнала, наследственности, деления, смерти и рождения новых клеток, а также внешней и внутренних мембран, роль которых сводится к вводу (выводу) информационных сигналов. Связь между ядром и мембранами осуществляется через биоключ, формирующийся в ионном растворе с большим разнообразием рецепторов, заполняющих пространство между ядром и мембранами.

Основную информационную нагрузку несет ядро (по аналогии с микропроцессором в вычислительном комплексе). В ядре синтезируются функции наследственности, рождения, формирования материального (телесного) образа и многие другие, на основе заложенных в них природой кодированных информационных матриц.

При внешнем воздействии наибольший эффект достигается при введении че рез внешний канал связи сверхмалых доз электромагнитного поля (менее 10 мВт/см2) миллиметрового диапазона. Больные клетки излучают электромагнитные волны, тем самым предупреждая здоровые клетки об опасности заболевания. Здоровые клетки, в свою очередь, увеличивают энергию излучения волн на собственных (тактовых) частотах

(65,1; 53,6; 42,25 ГГц) с целью обеспечения защиты. Здесь можно оказать помощь путем введения через канал синхронизации электромагнитного поля на указанных частотах [6].

В [8] биоклетка представлена в виде шара, заполненного цитоплазмой. Шар окружен тонкой стенкой, которая является мембраной. Если рассматривать данную систему как резонатор, то вполне очевидно, что она обладает спектром резонансных частот. Размер самой клетки составляет величину порядка 1 мкм, а мембраны – порядка 10 нм [6].

В общем случае можно считать, что цитоплазма по своим характеристикам близка к воде. Мембрана обладает упругими характеристиками – модулем упругости при двумерном растяжении в плоскости мембраны (характеризует силы, возникающие в мембране при изменении площади ее поверхности) и модулем поперечной упругости (характеризует силы, возникающие в мембране при изменении ее толщины). По поверхности мембраны, как с внешней стороны, так и с внутренней равномерно распределены заряды, общая величина которых составляет 10–13 – 10–14 Кл. Эта модель применима даже в большей степени не к живой сферической тонкой пленке (клетке), а к любой искусственной органической или неорганической сферической тонкой пленке.

Из всех приведенных выше моделей видно, что для теоретической оценки резонансных частот акустических колебаний биологической клетки подходит только последняя.

Также активно развивается новая область изучения биологического действия электромагнитных волн – действие сверхмалых доз, модулированных сигналов и воздействие с точки зрения автоколебательных процессов, что полезно не только с точки зрения биоэлектроники, но и медицины [9]. Данные многочисленные исследования показывают большую эффективность таких воздействий.

При поиске механизмов воздействия электромагнитных волн на живые организмы также большой интерес представляет задача поиска в них таких

систем, которые наиболее подвержены электромагнитному излучению. Очевидно, что большое влияние электромагнитные волны будут оказывать на каналы связи отдельных организмов и организма, как целого. У животных за это отвечает нервная система [10]. Несмотря на то, что растения не обладают таким эффективным проводником электрических импульсов, как нервная система у животных, тем не менее, удалось выявить, что в растениях возникают электрические сигналы в ответ на внешние воздействия [12]. Уже в начале XX века этим вопросом занимался Д. Бос [13]. Д. Бос проводил опыты на стыдливой мимозе, которая, так же, как и насекомоядные растения, проявляет способность к быстрым движениям в ответ на механическое раздражение. Используя весьма чувствительную экспериментальную технику, Д. Босс установил, что раздражение листа мимозы вызывает возникновение в черешке электрических импульсов, которые, распространяясь до листовых подушечек, приводят к их сокращению и опадению листа. Электрические импульсы в черешке мимозы оказались очень похожими на те, которые возникают в ответ на раздражение у животных.

В этих опытах были получены данные, показывающие, что весьма быстрые электрические ответные реакции на внешние раздражители можно наблюдать и у некоторых высших растений. Однако решающее значение в подтверждении этого положения сыграли работы И. И. Гунара и его школы [15], выполненные в 60х годах. Они показали, что способность отвечать на внешние раздражители генерацией электрических импульсов, распространяющихся по растению и очень напоминающих потенциалы действия в нервах, свойственна всем высшим растениям.

Набор раздражителей, вызывающих появление электрического сигнала, весьма разнообразен. Это может быть изменение температуры, механическое воз действие, облучение участка растения светом различного спектрального состава и так далее. При этом в ряде случаев клетки растений способны отвечать генерацией электрических сигналов на такие воздействия, которые

кажутся чрезвычайно слабыми. Например, понижение температуры от 23°С всего на 1 – 2°С вызывало гене рацию распространяющихся электрических сигналов в стебле тыквы [16]. Таким образом, в естественной обстановке возникновение электрических сигналов у растений должно быть связано с действием не только сильных, повреждающих факто ров, но и весьма слабых изменений в окружающей среде, которые постоянно наблюдаются в естественных условиях.

Удалось выявить три типа электрических сигналов, возникающих у растений в ответ на внешние воздействия. Первый тип – это потенциалы действия (ПД). На рисунке 1.1 а, б представлены записи ПД стебля тыквы и аксона кальмара. Видно, что внешне они очень сходны и состоят из двух ветвей: восходящей (или фазы де поляризации, во время которой происходит уменьшение потенциала возбудимой мембраны) и нисходящей (или фазы реполяризации, в ходе которой мембранный потенциал восстанавливается до исходного уровня). Амплитуда обоих ПД составляет несколько десятков милливольт.

Второй тип электрических сигналов у высших растений – это так называемые вариабельные потенциалы (ВП), которые возникают при действии весьма сильных раздражителей (ожог, механическое повреждение ткани). Как видно из рисунка 1.1 в, они лишь частично напоминают ПД. Как и у ПД, у них четко наблюдается фаза деполяризации. Однако фаза реполяризации очень растянута. ВП имеют природу, несколько отличную от природы ПД. Наконец, с помощью специальной чувствительной техники у высших растений были зарегистрированы микроритмы (рисунок 1.1 г), которые имеют очень небольшую амплитуду (обычно несколько микровольт) и носят весьма нерегулярный характер. Природа микро ритмов пока остается неясной [101].

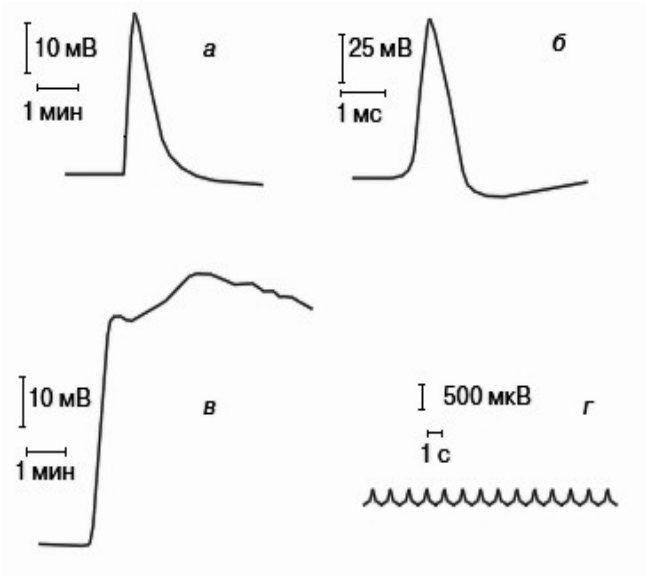


Рисунок 1.1 – Типы импульсной электрической активности у высших растений: а – потенциал действия, в – вариабельный потенциал, г – микроритмы.

Для сравнения приведена запись потенциала аксона кальмара (б)

Кроме этого канала связи, можно выделить канал, который реализуется путем излучения организмами (в частности, клетками) электромагнитных волн [9]. Был исследован феномен дистантных межклеточных информационных взаимодействий, обусловленных электромагнитным излучением [13].

Таким образом, экспериментальные данные об электромагнитном отклике живых объектов свидетельствуют о возможности их потенциального применения в биоэлектронике в качестве различных детекторов. Однако процесс взаимосвязи электромагнитного излучения и реакции организма остается неизученным.

Одной из гипотез является наличие механизма передачи электромагнитного излучения посредством пространственно-временного резонанса, заключающегося в равенстве длин волн акустических и электромагнитных колебаний. Понятие пространственно-временного резонанса не ново. Оно используется в физике плазмы при рассмотрении взаимодействия волн в плазме [15]. Также это применимо в других волновых

взаимодействиях [16]. Это взаимодействие основано на резонансе трёх волн: биение, образованное двумя волнами, попадает в резонанс с третьей волной. В этом случае необходимо одновременное выполнение условий как временного резонанса:

$\omega 1 = \omega 2 + \omega 3$, так и пространственного:

$\kappa 1 = \kappa 2 + \kappa 3$, где

ωi и ki – соответственно частоты и волновые векторы резонансно взаимодействующих волн. Условие временного резонанса (помноженное на постоянную Планка h) совпадает с условием распада элементарного возбуждения на два других. Условия резонанса, соответственно, являются законом сохранения энергии и импульса. Поэтому их часто называют распадными условиями, а соответствующий процесс – распадным взаимодействием волн. Однако, в этом случае, взаимодействующие волны имеют одинаковую природу. В случае взаимодействия электромагнитных и акустических волн, их природа будет различной, и условие про странственно-временного резонанса будет записываться иначе. Для плазмы, условие этого резонанса выводится из уравнений, описывающих плазму. В дан ной работе показано, что понятие пространственно-временного резонанса более широко, и не привязано к природе взаимодействующих волн. К тому же, в плазме этот резонанс относится к нелинейным явлениям.

В современной акустоэлектронике пространственно-временной резонанс не используется в явном виде, но применяется косвенно – так при конструировании встречно-штыревых преобразователей расстояние между соседними штырями равно половине длины волны, возбуждаемой ими поверхностной акустической волны [17]. При этом электрическое поле создается не электромагнитной волной, а приложенным к штырям электрическим напряжением.

Для теоретического рассмотрения взаимодействия физических полей в сферических тонких пленках необходимо воспользоваться уравнениями классической физики.

Для нахождения собственных частот электромагнитных колебаний сферических тонких пленок нужно использовать векторное уравнение Гельмгольца в криволинейных координатах:

$$\Delta E + \kappa^2 E = 0, \qquad \Delta H + \kappa^2 H = 0,$$

где k – волновое число, Δ – оператор Лапласа. Сшивая решение этого уравнения на границе тонкой пленки можно найти собственные частоты ее электромагнитных колебаний.

Для нахождения собственных частот акустических колебаний сферических тонких пленок нужно использовать уравнения акустики.

2 Практическая реализация исследования электромагнитных и акустических

резонансных явлений в тонких пленках

2.1 Исходные данные исследования

Для расчетов возьмем стальную струну, диаметром несколько миллиметров. Параметры такой струны представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры системы

Параметр	Значение
Плотность (ρ), кг/м	10^{-2}
Коэффициент сопротивления (*r*),	1
Натяжение струны (*T*), Н	10^{3}
Длина струны (*l*), м	0,5
Амплитуда силы (*A*), Н/м	10^{2}

При таких значениях собственная частота колебаний струны равна $\omega_0 = 2 \cdot 10^3$ с$^{-1}$, а период $T_0 = 3{,}14 \cdot 10^{-3}$ с.

Коэффициент сопротивления взят достаточно большим, так как он влияет только на амплитуду установившихся колебаний и время установления этих колебаний, поэтому коэффициент сопротивления выбирался из условия применимости численных методов решения для данной задачи. Из рисунка 2.3 видно, что при уменьшении коэффициента сопротивления увеличивается амплитуда колебаний, но и увеличивается время установления колебаний, что негативно сказывается на времени расчета. Из-за этого, полученные результаты должны рассматриваться только друг относительно друга. Амплитуда силы влияет на амплитуду установившихся колебаний линейно – при увеличении ее на порядок, амплитуда колебаний увеличивается тоже на порядок.

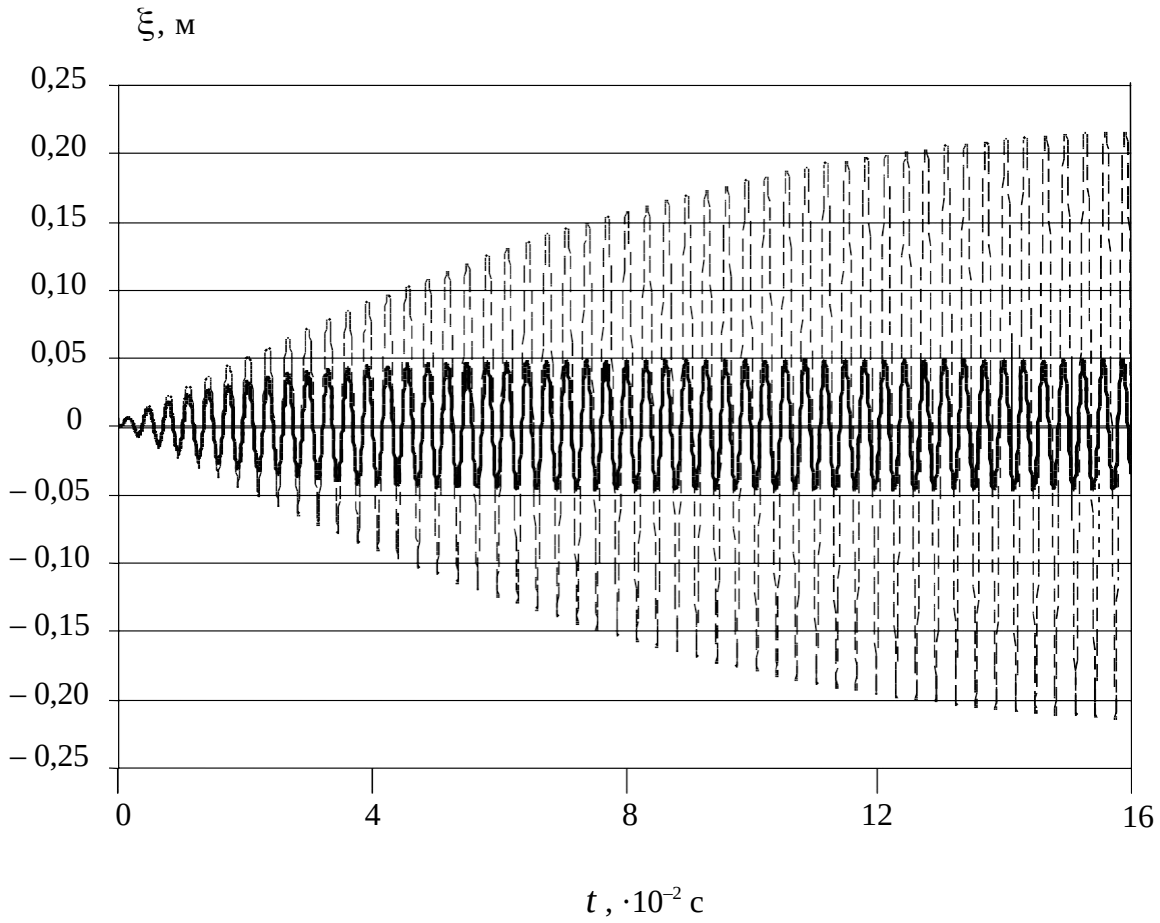


Рисунок 2.1 – Зависимость амплитуды установившихся колебаний и времени нарастания от коэффициента сопротивления. —— $r = 1$ кг/м·с, – – $r = 0{,}1$ кг/м·с

2.2 Процесс и результаты исследования электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках

Воздействие вида ***1п1в***, ***2п1в***, ***3п1в***

Рассмотрим сначала воздействие ***1п1в*** ($f_в(x, t) = A_1 \sin(kx)\sin(\omega_1 t)$ – (2.11)·(2.14)) – см. рисунок 2.2.

Как видно из рисунка 2.2, максимальное значение отклонения колебаний струны достигается, когда частота внешней силы равна частоте собственных колебаний системы, а вдоль струны укладывается половина длины волны.

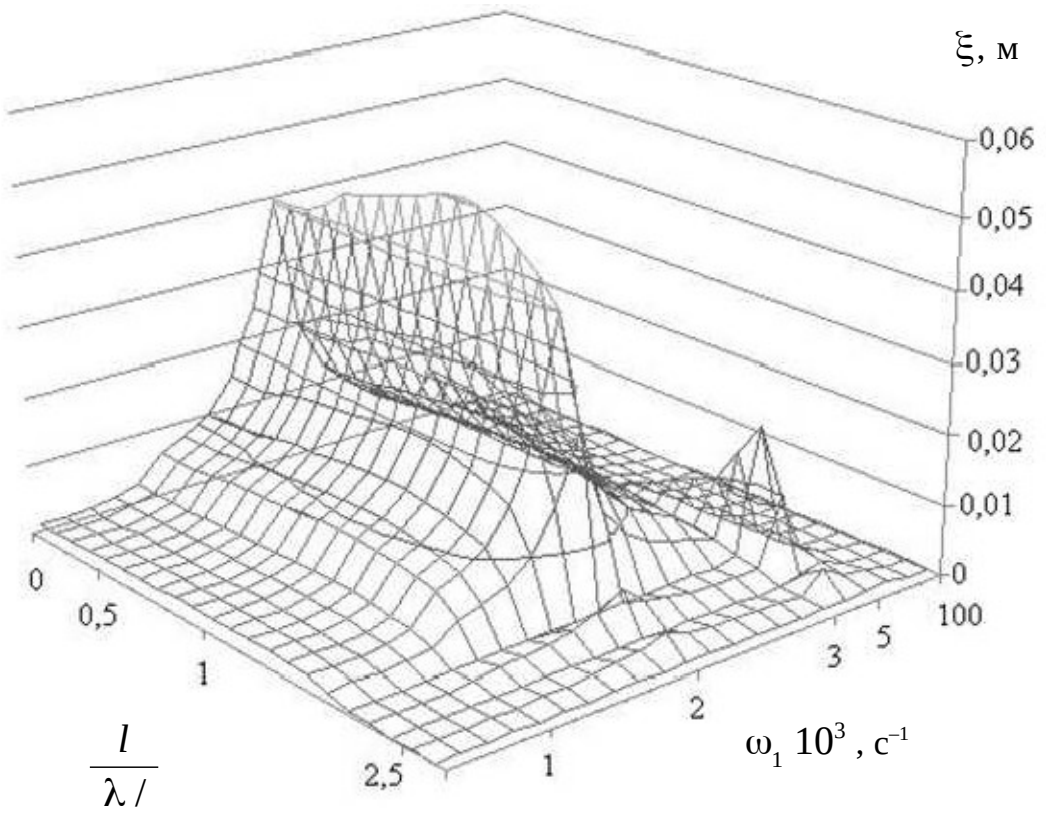


Рисунок 2.2 – Пространственно-временной резонанс

Рассмотрим этот рисунок в срезе. На рисунке 2.5 представлена резонансная кривая для случая $\frac{l}{\lambda/2} = 1$, а на рисунке 2.6 – для случая $\omega_1 = \omega_0$.

Особый интерес представляет пространственный резонанс. Как видно из рисунка 2.4, максимальное значение отклонения струны превышает значение отклонения струны при больших длинах волн не более чем на 25%. Но при уменьшении длины волны происходит резкое уменьшение отклонения струны – например, в случае, когда вдоль струны укладывается 4 полуволны отклонение струны составляет 0,4% от максимального. Также необходимо отметить, что резонансное нарастание амплитуды (рисунок 2.5) не наблюдается в случаях, когда частота вынуждающей силы не равна собственной частоте колебаний струны, а также в тех случаях, когда вдоль длины струны укладывается целое число полуволн (в этих точках наблюдаются локальные минимумы – см. рисунок 2.6).

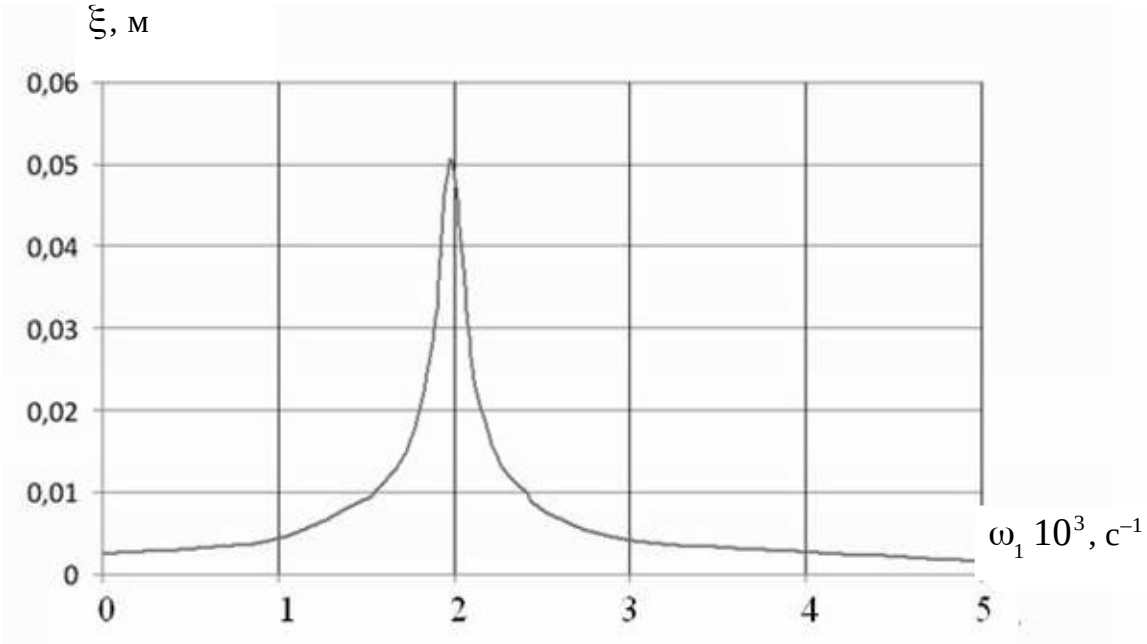


Рисунок 2.3 – Временной резонанс

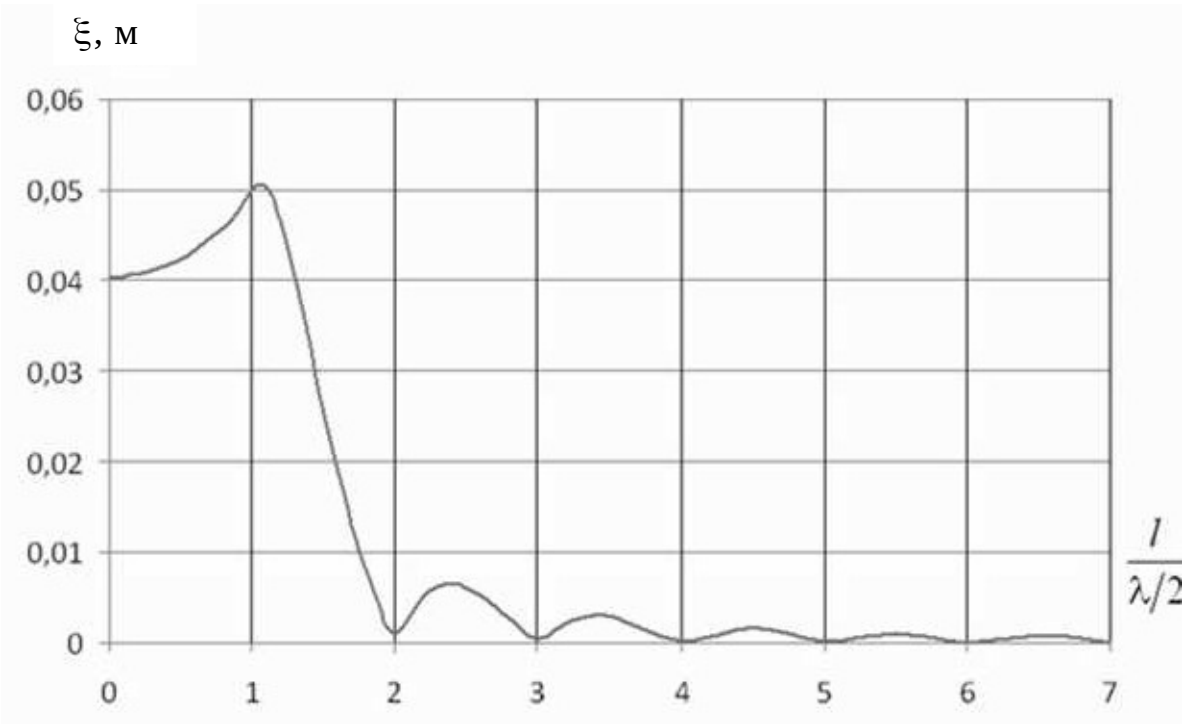


Рисунок 2.4 – Пространственный резонанс

На рисунке 2.5 представлен вид колебаний, когда частота вынуждающей силы равна собственной частоте колебаний струны.

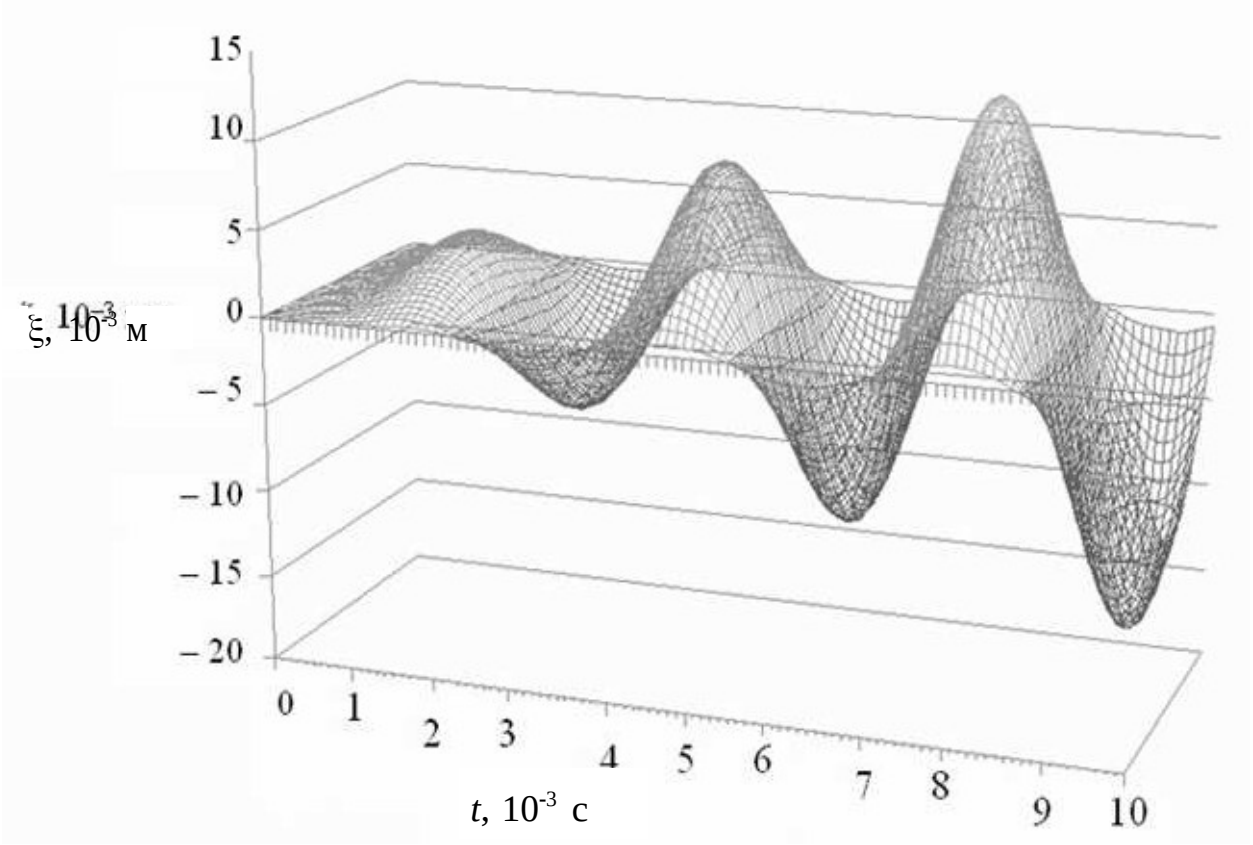


Рисунок 2.5 – Резонанс

В случае, когда частота вынуждающей силы меньше собственной частоты, колебания происходят с частотой вынуждающей силы – рисунок 2.6 $\left(\frac{l}{\lambda_2}\right)$.

Вначале заметны флуктуации колебаний, происходящие с собственной частотой системы. При уменьшении длины волны характер колебаний не меняется, только уменьшается амплитуда колебаний. То же происходит и при уменьшении длины волны, только разные точки струны будут колебаться в противофазе.

Интереснее картина получается, когда частота вынуждающей силы больше частоты собственных колебаний системы (рисунок 2.7). В этом случае струна начинает колебаться с собственной частотой, а через некоторое время (в данном случае – 0,1 с) колебания начинают совершаться с частотой вынуждающей силы.

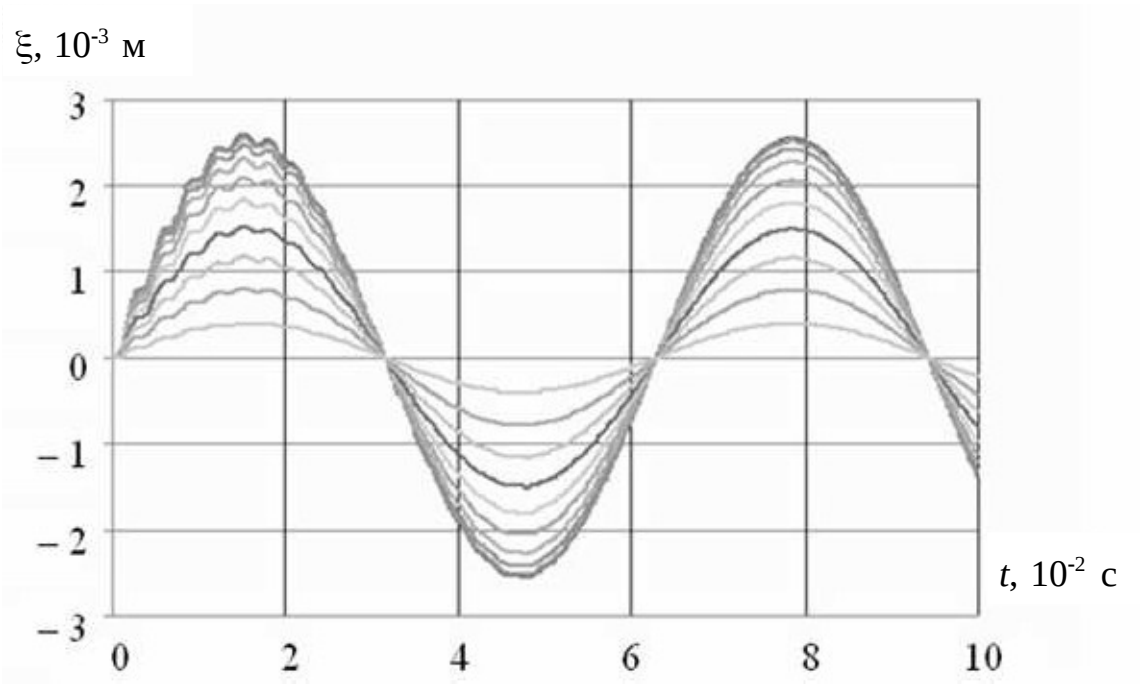


Рисунок 2.6 – Частота вынуждающей силы $\omega_1 = 10^2 \text{ с}^{-1} \left(\frac{l}{\lambda} | 2 \quad 1 \right)$

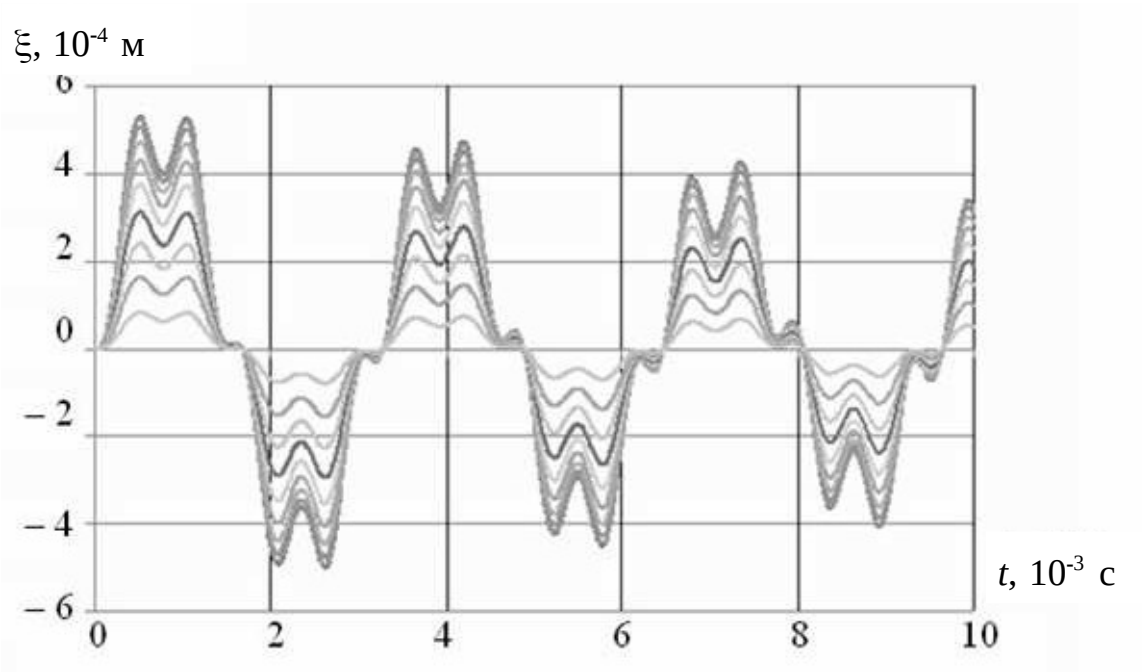


Рисунок 2.7– Частота вынуждающей силы $\omega_1 = 10^4 \text{ с}^{-1} \left(\frac{l}{\lambda} | 2 \quad 1 \right)$

При других длинах волн характер колебаний не меняется, только уменьшается амплитуда колебаний.

Теперь рассмотрим воздействие ***2n1в*** ($f_в(x,t) = A_2 \sin(\omega_1 t)$, $x = x_0$ – (2.12)·(2.14)). В этом случае максимум отклонения достигается при условии $\omega = \omega_0$ и $x_0 = l/2$. Максимальное значение отклонения струны при этом на 25% больше, чем в предыдущем случае. При частотах вынуждающей силы $\omega_1 \leq \omega_0$ общий характер колебаний струны такой же, как и в предыдущем случае. Для частоты вынуждающей силы $\omega_1 > \omega_0$ характер несколько иной – см. рисунок 2.10.

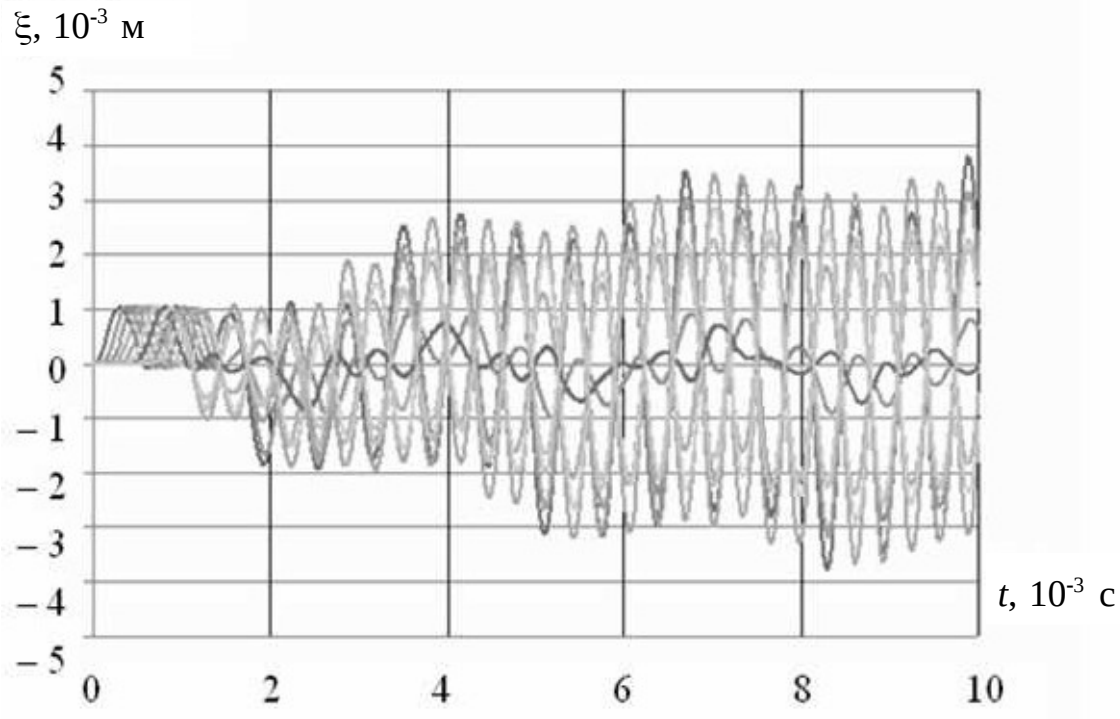


Рисунок 2.8 – Частота вынуждающей силы $\omega_1 = 10^4$ с$^{-1}$

В этом случае вначале разные точки струны колеблются с частотой вынуждающей силы, но с разными фазами.

В случае воздействия ***3n1в*** ($f_в(x,t) = A_3 \sin(\omega_1 t)$ – (2.13)·(2.14)) струна ведет себя средне между двумя предыдущими случаями, но с меньшими отклонениями. На рисунке 2.11 представлен вид колебаний струны, когда частота вынуждающей силы $\omega_1 > \omega_0$. Как видно, струна начинает колебаться с собственной частотой, но очень быстро частота колебаний струны становится равной частоте вынуждающей силы ω_1 – в данном случае через 10^{-2} с после начала колебаний.

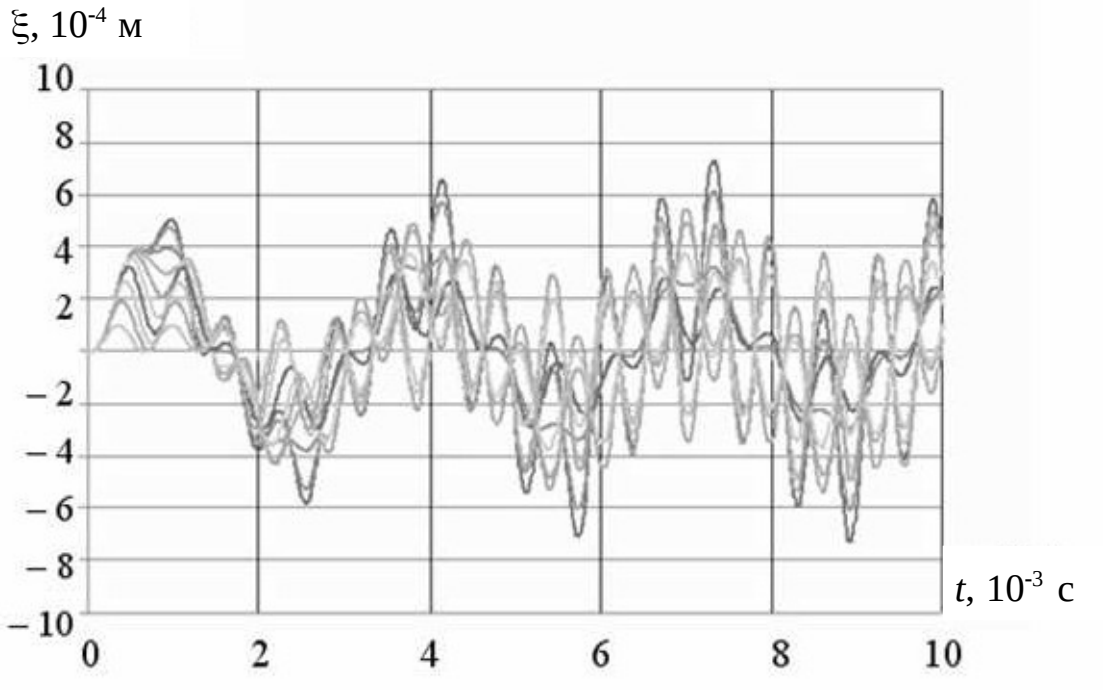


Рисунок 2.9 – Частота вынуждающей силы $\omega_1 = 10^4$ с$^{-1}$

В таблице 2.2 представлены максимальные значения отклонения струны для различных пространственных распределений вынуждающей силы и их отношения друг к другу.

Таблица 2.2 – Амплитуды колебаний при резонансе

Типы воздействий	
1n1в (ξ, м)	0,0506
2n1в (ξ, м)	0,0635
3n1в (ξ, м)	0,0404
2n1в/1n1в	1,25
1n1в/3n1в	1,25
2n1в/3n1в	1,57

Воздействие вида ***1n2в***, ***2n2в***, ***3n2в***

Рассмотрим воздействие вида ***1n2в*** (импульсный сигнал). Зависимость вынуждающей силы от времени представлена на рисунке 2.10. Наибольшие откло-

нения струны возникают для случая $n = 1$. При увеличении частоты ω_1 на порядок (то есть уменьшение ширины импульса) амплитуда колебаний струны уменьшается тоже на порядок, но при этом увеличивается время расчета, так как необходимо уменьшить шаг интегрирования. Поэтому все дальнейшие расчеты представлены для случая $\omega_1 = 10^5$ с$^{-1}$.

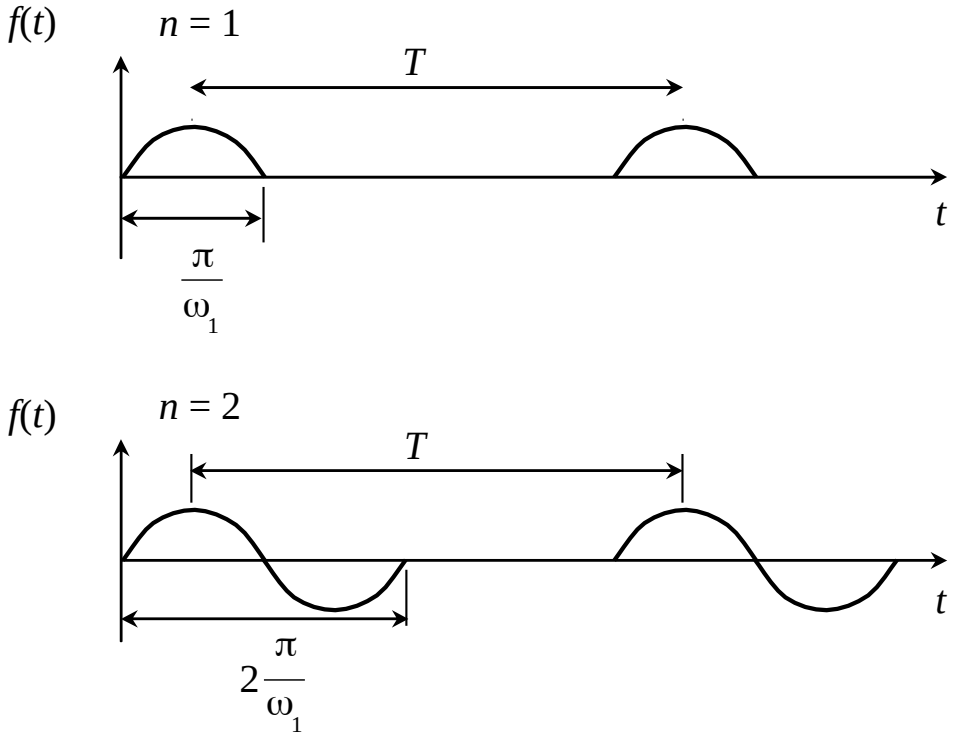


Рисунок 2.10 – График функции (9)

На рисунке 2.11 представлена зависимость амплитуды колебаний струны от периода импульсного сигнала $\left(\frac{l}{\lambda|2} \quad 1\right)$. Главный резонанс наблюдается при $T = T_0 = 3{,}14 \cdot 10^{-3}$ с , другие резонансы возникают при $T = 2T_0 = 3T_0$ и т. д.

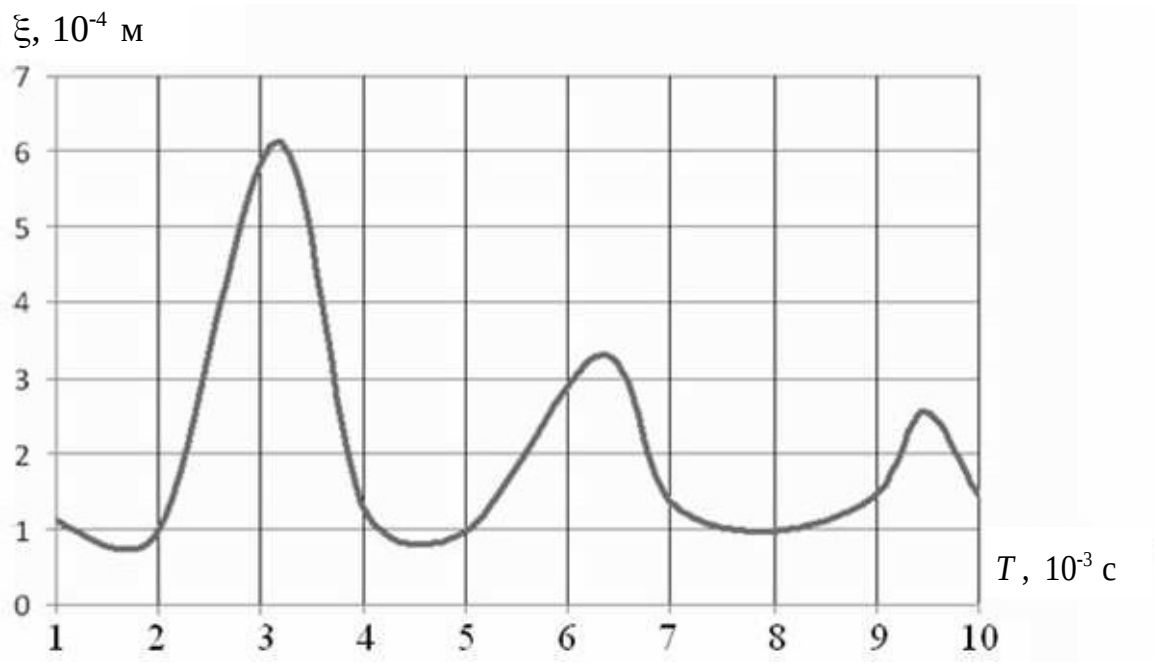


Рисунок 2.11 – Временной резонанс

Пространственный резонанс (рисунок 2.12) опять возникает при условии $\frac{l}{\lambda/2} = n$ и более ярко выражен относительно малых длин волн, чем больших.

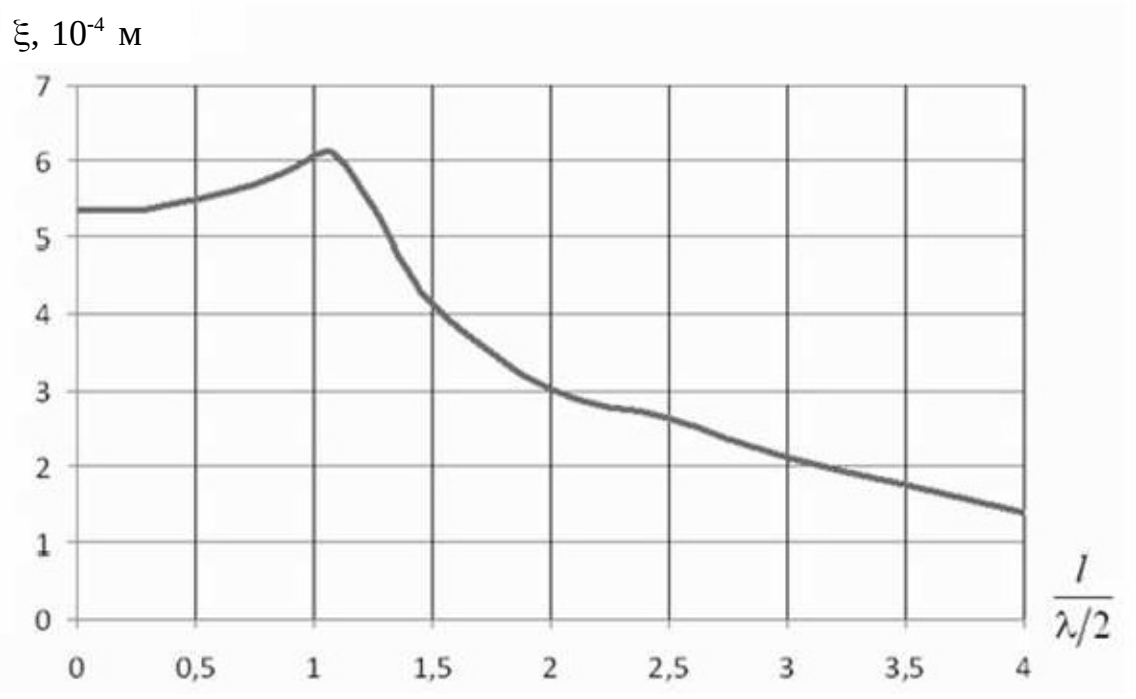


Рисунок 2.12 – Пространственный резонанс

На рисунке 2.13 показано резонансное возрастание амплитуды колебаний струны. Характер резонансного возрастания амплитуды не зависит от количества полуволн, укладывающихся вдоль струны (это влияет только на амплитуду).

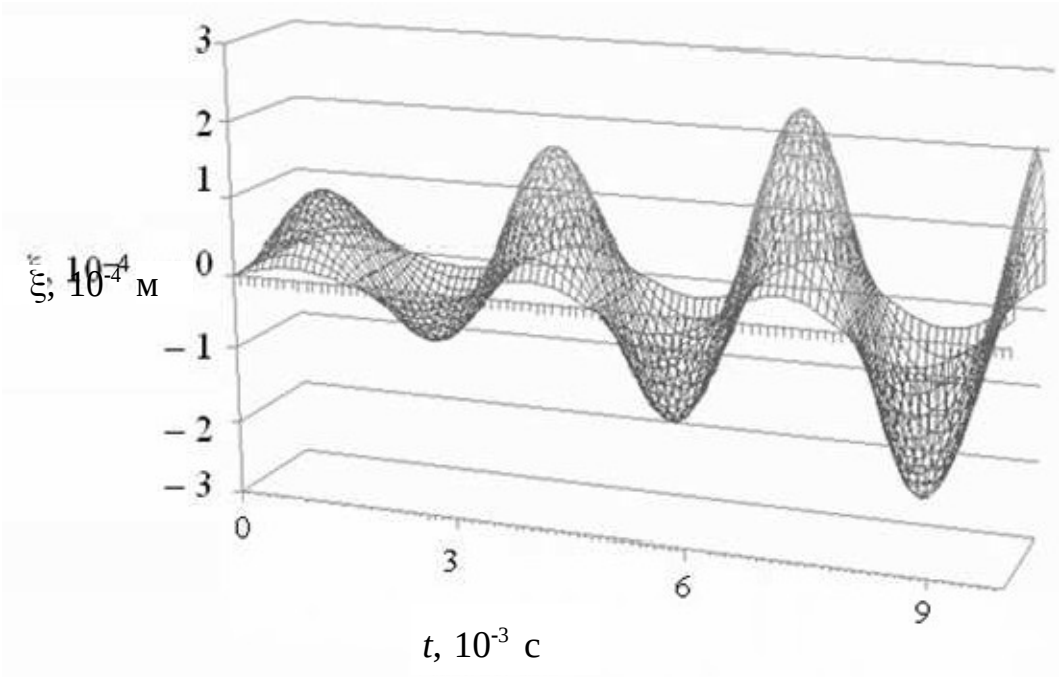


Рисунок 2.13 – Резонансные колебания

При воздействиях вида 2***n2в*** и 3***n2в*** результаты будут схожими, но в случае точечного приложения силы отклонение будет больше, а при равномерно распределенной силе – меньше (см. таблицу 2.3).

Таблица 2.3 – Амплитуды колебаний при резонансе

Типы воздействий	
1n2в (ξ, $\cdot 10^{-4}$ м)	6,60
2n2в (ξ,$\cdot 10^{-4}$ м)	7,97
3n2в (ξ,$\cdot 10^{-4}$ м)	5,67
2n2в/1n2в	1,21
1n2в/3n2в	1,16
2n2в/3n2в	1,41

Воздействие вида ***1п3в***, ***2п3в***, ***3п3в***

Для таких воздействий (временная зависимость выражается формулой (2.16)) были взяты следующие параметры. Частота ω_1 изменялась так же, как и в начале этого пункта. Частота ω_2 имела фиксированное значение 10^5 $с^{-1}$ (увеличение этой частоты практически не влияет на результат вычислений, однако увеличивается время расчета). Коэффициент $B = 1$.

Отличие воздействий вида ***1п3в***, ***2п3в***, ***3п3в*** от воздействий вида ***1п1в***, ***2п1в***, ***3п1в***, соответственно, не превышает 0,1% (см. таблицу 2.4).

Таблица 2.4 – Отношение амплитуд колебаний при резонансе

Отношение воздействий	
1п1в/1п3в	0,999916
2п1в/2п3в	0,999869
3п1в/3п3в	0,999161

Если воздействие представляет собой биения (сумма двух высокочастотных сигналов с близкими частотами, разность между которыми равна собственной частоте колебаний струны), то резонанса не наблюдается, а амплитуда колебаний мала.

2.3 Моделирование электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках и формирование выводов

Кроме возбуждения колебаний стоячей волной, также интересен случай возбуждения акустических колебаний бегущей волной.

Вначале рассмотрим влияние плоской электромагнитной волны. В этом случае вынуждающую силу можно расписать в виде:

$$f_в = A\cos(\omega t - kx),$$

где A – амплитуда вынуждающей силы, ω – частота, k – волновое число. Волна распространяется вдоль струны.

На рисунке 2.14 представлены результаты численного решения уравнения.

По оси значений отложено максимальное отклонение струны от положения равновесия для различных значений частоты вынуждающей силы и волнового числа.

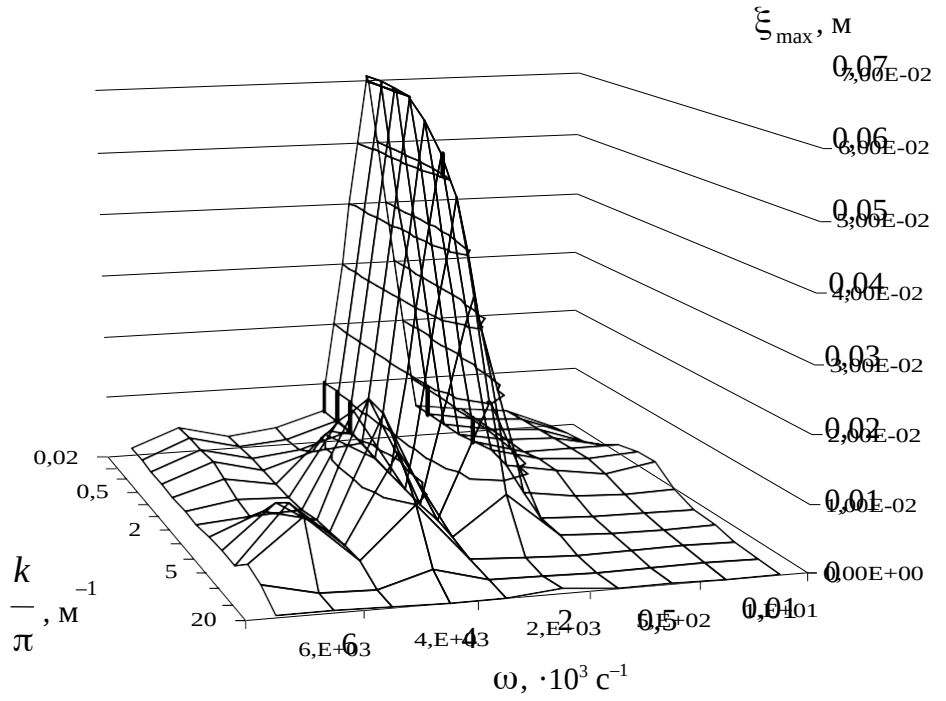


Рисунок 2.14 – Зависимость максимального отклонения струны от частоты ω и волнового числа k.

Резонансное увеличение амплитуды наблюдается при частотах, кратных собственной частоте колебаний, максимум смещается в область больших волновых чисел k , то есть в область меньших длин волн. Как видно из рисунка 2.15, максимальное значение отклонения колебаний струны достигается, когда частота внешней силы равна частоте собственных колебаний системы, а вдоль струны укладывается больше половины длины волны. Это объясняется тем, что при малых волновых числах слагаемым kx в уравнении можно пренебречь. В этом случае сила практически равномерно распределена вдоль струны и меняется с частотой ω – классический резонанс. Зависимость максимального отклонения струны от волнового числа при $\omega = 2 \cdot 10^3$ с$^{-1}$ представлена на рисунке 2.16.

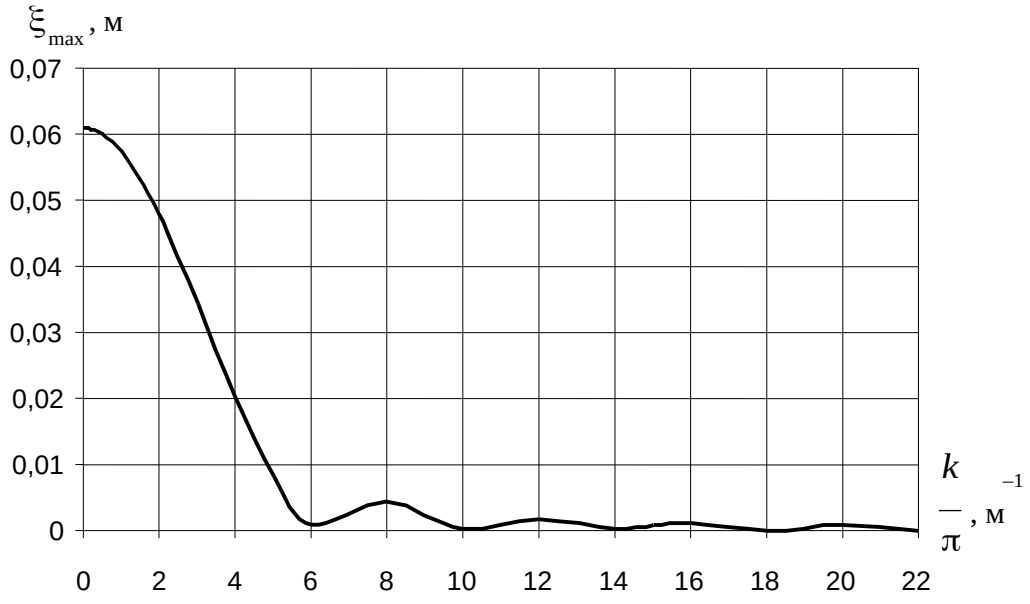


Рисунок 2.15 – Пространственный резонанс

В отличие от стоячей волны [11], в которой минимумы отклонения получаются при условии, что вдоль струны укладывается две, три, и т. д. длин полуволн, для бегущей волны минимумы получаются, когда отношение длины струны к длине волны равно 1,5, 2,5, и т. д., а максимум – когда это отношение равно 2, 3, и т. д.

В случае, когда частоты вынуждающей силы и собственных колебаний равны, колебания будут хорошо возбуждаться, когда длина волны больше длины струны. Это условие соблюдается, когда вынуждающая сила обусловлена электромагнитным излучением. Однако в этом случае частота акустических колебаний струны лежит в диапазоне $10^3 \div 10^5$ Гц. Длина соответствующей электромагнитной волны составляет $3 \div 300$ км. Это очень большие длины волн и делать оборудование, работающее в этом диапазоне, бессмысленно – проще воздействовать переменным электрическим полем. В реальности более применимы случаи, когда длины волн электромагнитных волн равны или немного больше размера облучаемого объекта (струны). В этом случае частота электромагнитного колебания много больше частоты собственных акустических колебаний.

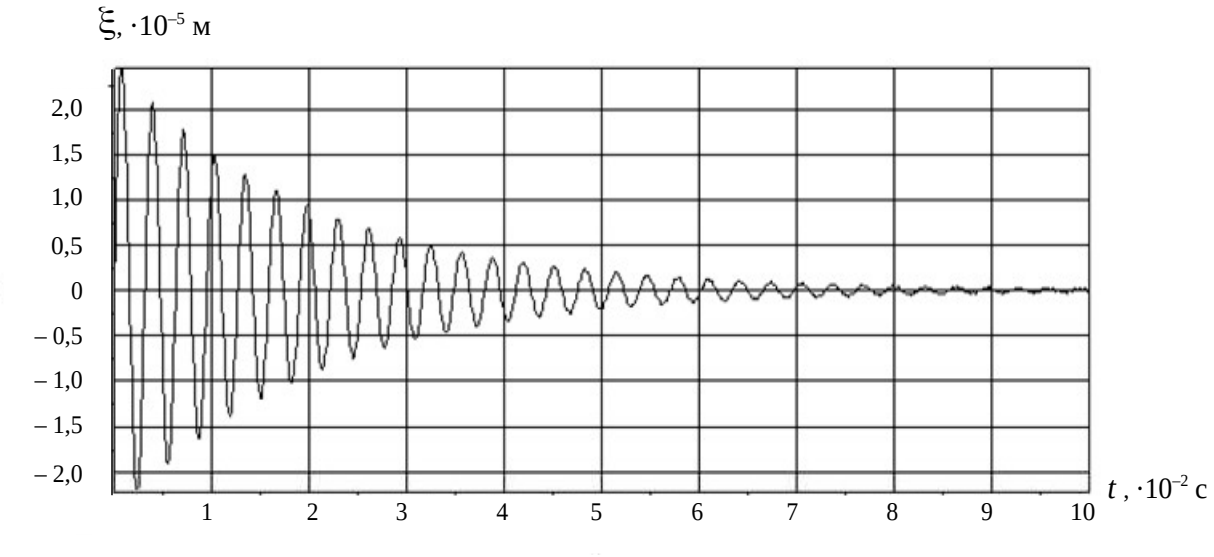


Рисунок 2.16 – Колебания струны при частоте вынуждающей силы больше частоты собственных колебаний

На рисунке 2.16 представлен вид колебаний средней точки струны, когда частота вынуждающей силы на два порядка больше собственной частоты колебаний струны ($\omega = 2 \cdot 10^5$ $с^{-1}$), волновое число $k = \frac{}{2\pi}$ $м^{-1}$. Колебания струны уменьшаются с течением времени. Попробуем найти воздействие, которое позволит

справиться с этой трудностью. Простейший вариант – если воздействие давать

порциями – узкими импульсами, период которых равен периоду собственных колебаний струны (либо кратным периоду, однако в этом случае амплитуда колебаний будет меньше). На рисунке 2.26 представлены результаты для случая импульсного воздействия с периодом импульса $T = 3{,}14 \cdot 10^{-3}$ с ($k = \frac{}{2\pi}$ м$^{-1}$, $\omega = 2 \cdot 10^5$ с$^{-1}$). Как видно, в этом случае колебания струны представляют собой биения, амплитуда которых больше амплитуды колебаний при непрерывном воздействии. При увеличении или уменьшении частоты амплитуда колебаний будет уменьшаться, а сами колебания будут представлять собой не биения, а иметь более сложный вид. При частотах, кратных собственной частоте будут наблюдаться локальные максимумы, а вид колебаний будет приближаться к биениям.

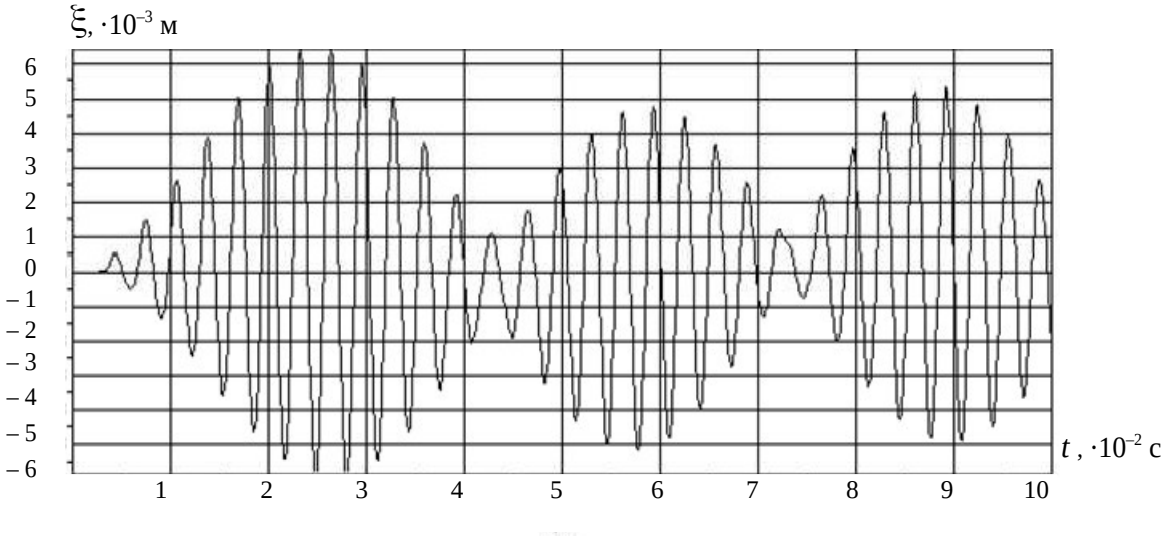


Рисунок 2.17 – Колебания струны при частоте импульсной вынуждающей силы больше частоты собственных колебаний

На рисунке 2.18 представлен график зависимости амплитуды колебаний струны при импульсном воздействии от длины волны силы, при условии, что период импульсов равен периоду собственных колебаний струны. Очевидно, что наилучший результат достигается при условии, когда длина волны воздействия больше длины струны. Поэтому можно предположить, что при импульсном

воздействии электромагнитных волн на колебательные системы основное внимание должно быть уделено периоду импульсов, который должен быть равен периоду собственных акустических колебаний системы, либо других структур, а частота и длина волны не так важны, особенно если длина волны больше размеров системы. Также из рисунка 2.18 видно, что минимумы амплитуды наблюдаются, когда вдоль струны укладывается 2,5, 3,5 и т. д. длин волн воздействия, а максимумы – 3, 4 и т. д. длин волн.

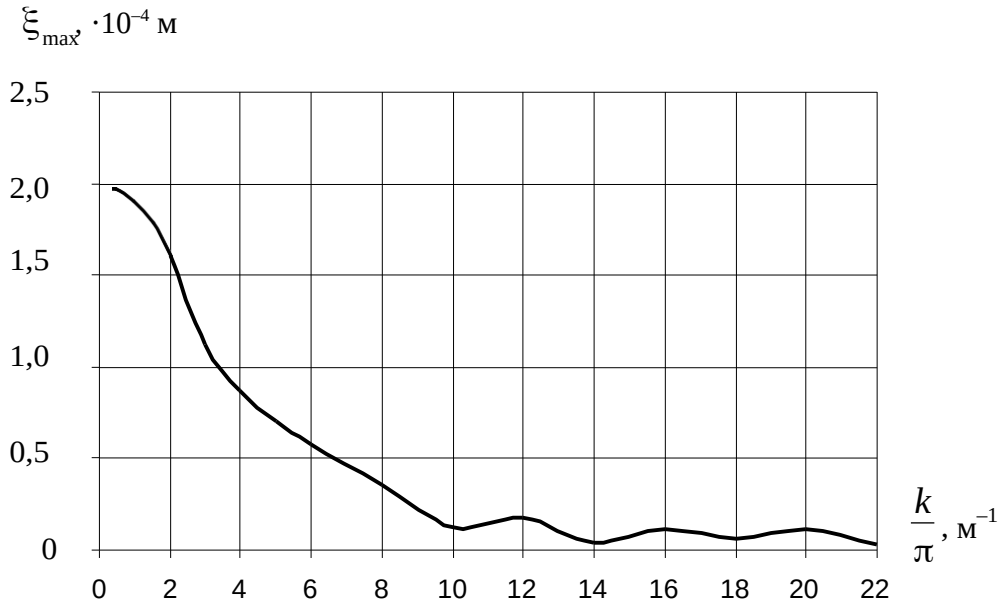


Рисунок 2.18 – Зависимость амплитуды колебаний от длины волны при импульсном воздействии

Другой способ увеличения амплитуды колебаний – частотная модуляция. В этом случае частота в уравнении изменяется по закону:

$$\omega = \omega_1 (1 + B\cos(\omega_2 t)).$$

Оставляя все величины прежними ($k = 2\pi$ м$^{-1}$, $\omega_1 = 2 \cdot 10^5$ с$^{-1}$), можно получить зависимость максимального отклонения струны от положения равновесия от частоты ω_2. На рисунке 2.19 представлена эта зависимость для значения $B = 0{,}01$.

При малых частотах ω_2 частота ω остается практически неизменной, и колебания струны будут иметь вид, схожий с колебанием струны, представленном на рисун-

ке 2.25. При высоких частотах колебания будут иметь сложный вид, а амплитуда

будет на порядок выше, чем при импульсном воздействии. Наибольшее отклонение будет наблюдаться, когда частота ω_1 будет в два раза меньше частоты ω_2. Вид колебаний в этом случае представлен на рисунке 2.19.

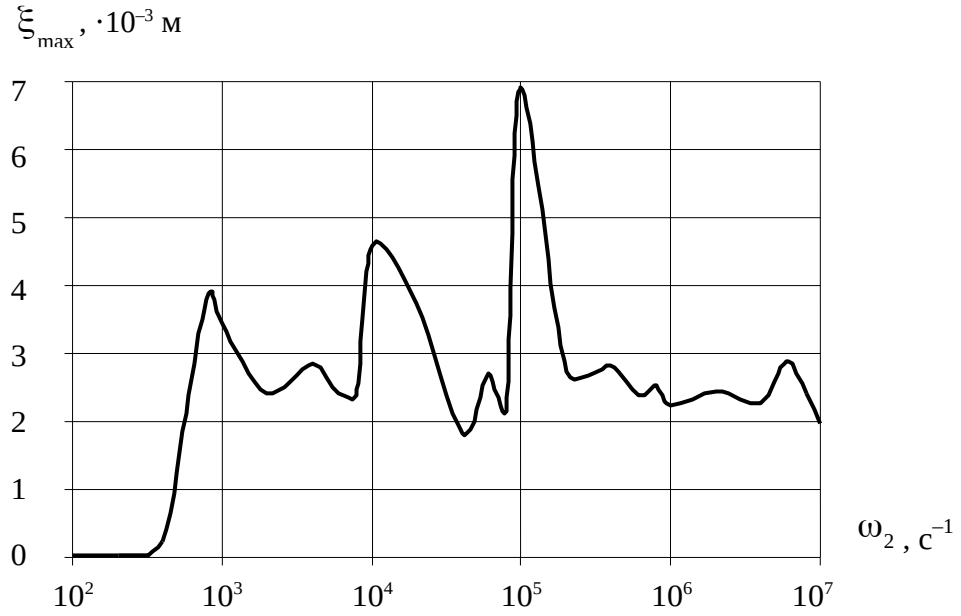


Рисунок 2.19 – Зависимость амплитуды колебаний от частоты ω_2

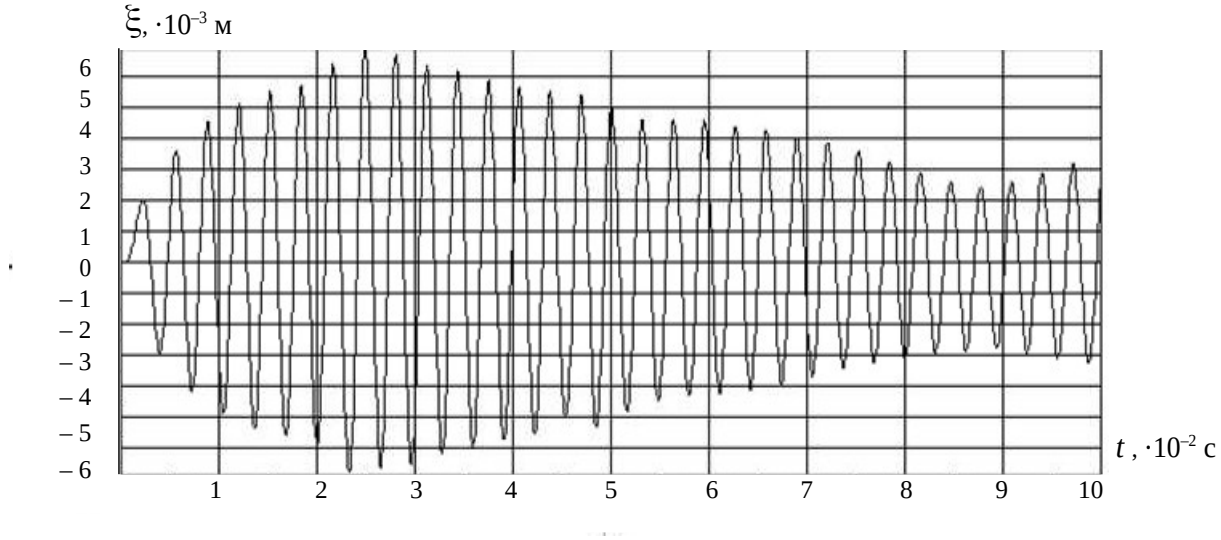


Рисунок 2.20 – Вид колебаний при частотной модуляции при $\omega_2 = 10^5$ $с^{-1}$

Кроме амплитудной и частотной модуляции, существует также фазовая модуляция. Однако расчеты показали, что если фаза меняется по гармоническому

закону, то колебания будут иметь такой же вид, как и колебание, представленное на рисунке 2.20.

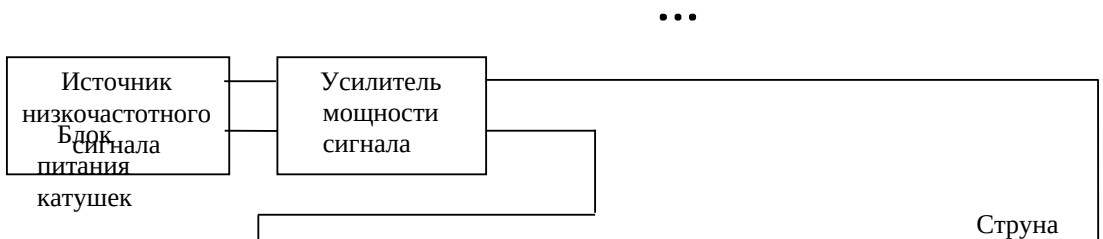
Полученные теоретические предпосылки, указывающие на существование пространственно-временного резонанса, необходимо доказать экспериментально. Так как существование временного резонанса доказывается большим количеством экспериментальных данных, то основное внимание надо уделить пространственному резонансу – то есть проверить, как распределение переменной силы вдоль струны влияет на ее вынужденные акустические колебания.

Возбуждать акустические колебания струны можно различными способами. В данной работе возбуждение акустических колебаний производится путем воздействия магнитного поля различной пространственной конфигурации на металлическую струну, подключенную к генератору переменного тока. Таким образом, акустические колебания зависят как от частоты переменного тока, так и от конфигурации магнитного поля. Такой способ возбуждения технически оптимальный.

Таким образом, ставится задача нахождения такой конфигурации магнитного поля, при которой амплитуда колебаний будет максимальной, с учетом совпадения собственной частоты колебаний струны с частотой переменного тока.

Схема эксперимнтальной установки

Принципиальная схема установки показана на рисунке 2.33. Источники магнитного поля – электромагниты – 9 штук (взяты из реле РЭН20 РХ4.506.102П [12], обладают одинаковыми индуктивностями $L =$ 1,6 Гн и сопротивлениями $R =$ 280 Ом), подключены параллельно к блоку питания. Источник низкочастотного сигнала – генератор ГЗ – 120.



…

Рисунок 2.21 – Общая схема установки

К электромагнитам от блока питания подводится питание 80 В. Блок питания – понижающий трансформатор с диодным мостом и фильтрующим конденсатором [13]. Сигнал с генератора подается на усилитель (рисунок 2.22) [14], а затем на струну. Гармоничность сигнала на выходе усилителя проверялась с помощью осциллографа. Последовательно с каждым электромагнитом установлен переменный резистор для изменения конфигурации магнитного поля вдоль струны путем изменения напряжения на электромагнитах.

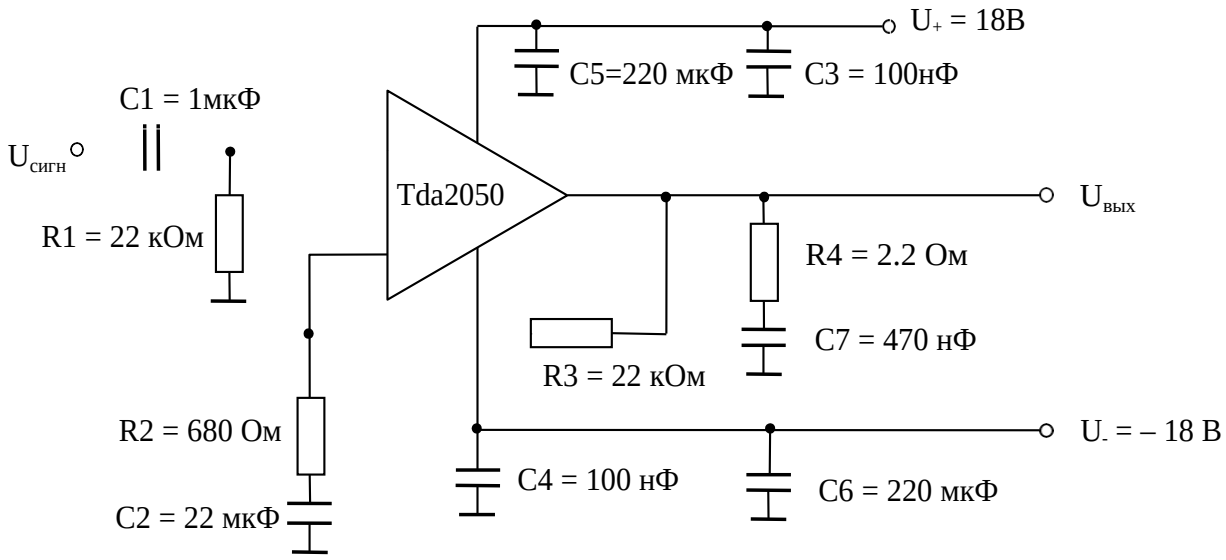


Рисунок 2.22 – Схема усилителя мощности сигнала

Показания со струны снимались с помощью электромагнитных звукоснимателей (single, humbacker), пьезоэлектрического звукоснимателя и профессионального студийного инструментального микрофона Shure SM57. Сигнал подавался на линейный вход внешней звуковой карты M-Audio Fast Track и обрабатывался с помощью спектроанализатора. Параметры системы определялись с помощью цифрового мультиметра VC9805A. Погрешность измерения постоянного напряжения составляет 0,5 %, переменного напряжения – 0,8 %, индуктивности и емкости – 2,5 %, сопротивления – 0,8 %.

Сбор экспериментальной установки

Электромагниты, струна, блок питания – крепятся на деревянной балке. Электромагниты устанавливаются в шахматном порядке. Для блока питания строится корпус, на крышке корпуса устанавливаются переключатели полярности (шестиконтактные выключатели) и переменные резисторы 3,3 кОм. Струна устанавливается на два порожка (металлические уголки). Одним концом струна закреплена на гитарном колке, с помощью которого можно изменять натяжение струны, то есть изменять собственную частоту колебаний струны.

Усилитель НЧ сигнала реализован на микросхеме tda2050 [15], блок питания усилителя аналогичен блоку питания электромагнитов.

Электромагнитные звукосниматели устанавливаются под струной ($r \approx 5$ мм), пьезоэлектрический звукосниматель крепится к порожку, микрофон устанавливается в непосредственной близости от струны ($r < 1$ см).

Построение градуировочного графика.

Для того чтобы задать нужную конфигурацию поля нужно знать, как зависит сила, создаваемая электромагнитом, от приложенного к нему напряжения. Как известно, если прикладывать переменную силу к центру струны, то амплитуда вынужденных колебаний струны будет пропорциональна амплитуде силы [16]. В нашем случае, сила будет зависеть от постоянного напряжения, подаваемого на катушки. Таким образом, требуется построить градуировочный график – зависимость амплитуды колебаний струны от напряжения на электромагните.

Амплитуду колебаний можно измерить с помощью высокочувствительного микрофона, подключенного к линейному усилителю (аудиокарта). Напряжение измеряется непосредственно – с помощью мультиметра.

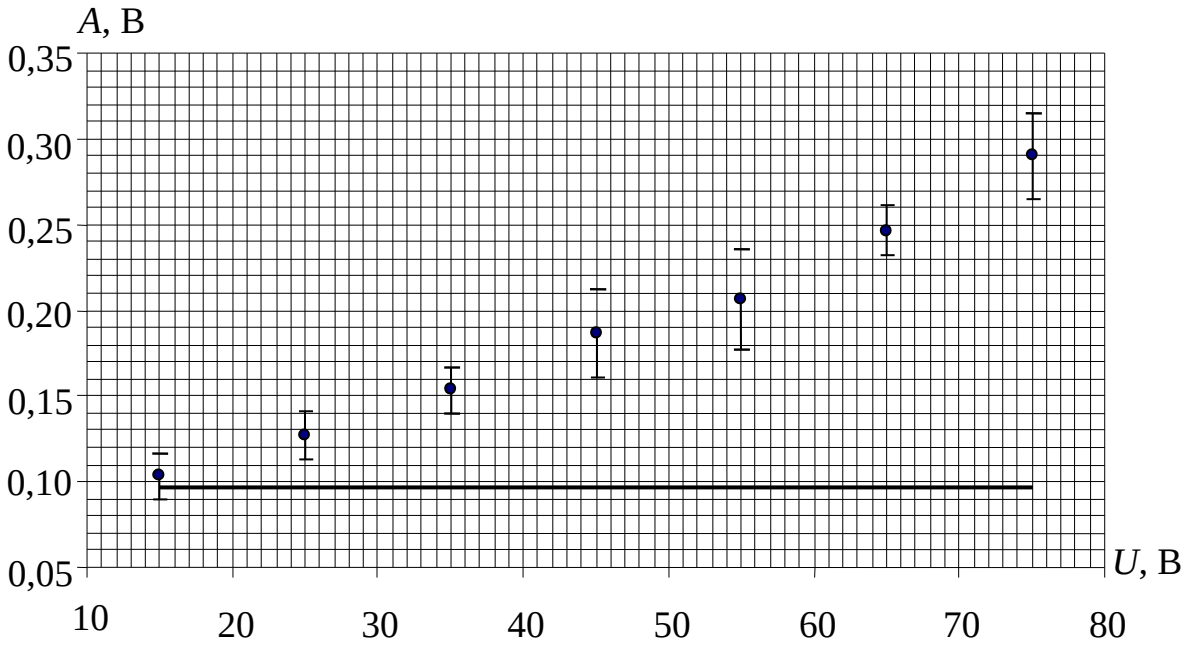


Рисунок 2.23 – Градуировочный график

На рисунке 2.23 амплитуда указана в вольтах – это тот сигнал, который попадает с микрофона на звуковую карту. Так как использовался профессиональный микрофон, то напряжение на выходе микрофона очень точно повторяет амплитуду колебаний струны.

Величина достоверности линейной аппроксимации, представленной на градуировочном графике составляет $R^2 = 0{,}9878$ [17] – чем ближе она к единице, тем точнее аппроксимация.

Сбор данных

С градуировочным графиком можно выставить нужную конфигурацию магнитного поля. Выберем конфигурации так, чтобы распределение силы вдоль струны соответствовало четверти, половине и целому периоду синуса. Амплитуды электромагнитов подобраны так чтобы суммарный модуль амплитуд был одинаков во всех трех конфигурациях (таблица 2.5).

Таблица 2.5 –Данные амплитуд для электромагнитов

Точки приложения вынуждающей силы вдоль длины струны	Распределение напряжения вдоль струны U , B		
	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{2}$	λ
0	0	0	0
0,1	5	12	41
0,2	11	39	74
0,3	21	60	74
0,4	34	73	41
0,5	45	77	0
0,6	54	73	– 41
0,7	62	60	– 74
0,8	67	39	– 74
0,9	70	12	– 41
1,0	74	0	0
Сумма	442	445	460

Различными звукоснимателями на резонансной частоте струны 220 Гц получены данные об амплитуде колебаний для трех распределений силы вдоль струны. Резонанс струны был найден по спектру свободных колебаний струны. Также при изменении частоты генератора амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает вблизи резонансной частоты. Частоту колебаний можно менять с помощью натяжения струны посредством колка, а также путем замены струны. Выбор собственной частоты обусловлен тем, что один из максимумов чувствительности микрофона лежит в этой области (рисунок 2.36).

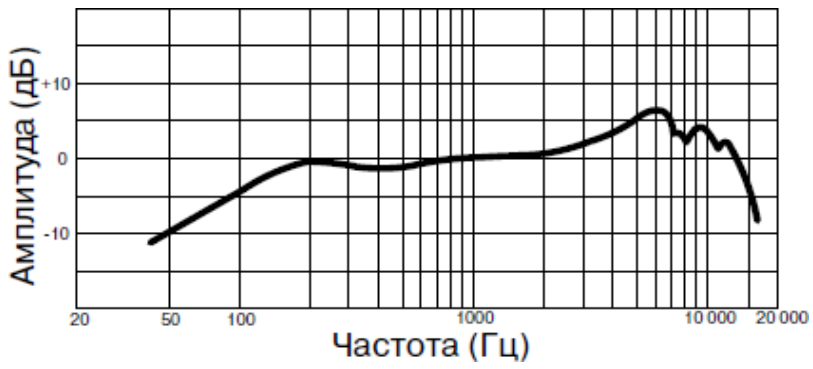


Рисунок 2.24 – АЧХ микрофона Shure SM57

В таблице 2.6 приведены результаты эксперимента. Точки съема амплитуды колебаний струны 1, 2, 3 имеют координаты $l/4$, $l/2$, $3l/4$ соответственно. В таблице не приведены не приведены результаты $3/4\lambda$.

Таблица 2.6 – Результаты эксперимента

Точки снятия	точка 1	точка 2	точка 3	точка 1	точка 2	точка 3	пьезоэлектрический датчик, $\cdot 10^{-2}$ В
Размер струны	микрофон, $\cdot 10^{-2}$ В			электромагнитный звукосниматель, $\cdot 10^{-2}$ В			
λ	20	15	17	22	5	33	21
	20	15	14	26	6	27	23
	14	13	14	18	8	22	26
	15	14	14	17	10	20	27
	13	12	15	15	11	21	25
	14	13	11	22	8	23	26
	16	14	12	20	9	25	24
	17	15	12	19	7	21	24
	16	14	11	23	9	20	27
	18	14	16	18	10	19	26
	16 ± 2	14 ± 1	14 ± 1	20 ± 2	8 ± 1	23 ± 3	25 ±1
$\frac{\lambda}{2}$	36	40	42	29	41	38	45
	39	41	43	31	38	34	44
	37	40	43	33	40	34	46
	39	41	44	32	41	37	43
	39	41	42	36	42	38	44
	37	41	44	30	41	34	42
	39	43	43	41	42	39	43
	39	40	42	42	41	42	44
	38	42	42	41	40	39	43
	37	41	43	42	43	39	44
	38 ± 1	41 ± 1	43 ± 1	36 ± 4	41 ± 1	37 ± 2	44 ± 1
$\frac{\lambda}{4}$	30	28	40	32	40	34	30
	29	30	40	31	42	37	29
	31	29	41	32	43	38	31
	31	32	40	30	43	39	32
	30	36	41	30	43	39	30
	29	33	40	31	37	40	30
	28	31	39	32	40	36	28
	28	30	38	31	39	39	29
	30	31	36	32	39	36	31
	29	31	34	32	38	33	30
	30 ± 1	31 ± 2	39 ±2	31 ± 1	40 ± 2	37 ± 2	30 ± 1

Как видно, в целом амплитуда вынужденных колебаний максимальна, когда вдоль струны укладывается половина длины волны. При увеличении длины волны амплитуда уменьшается слабее, чем при уменьшении длины волны, что согласуется с теорией [8]. Также, при малой длине волны возбуждаются в боль- шей степени не основное колебание, а гармоники.

Параметры установки определялись параметрами струны. Длина измерялась, диаметр и линейная плотность являются известными для любой струны. Исходя из частоты, на которую настроена струна, можно найти ее натяжение. Коэффициент затухания, а, следовательно, и коэффициент сопротивления, находится исходя из времени релаксации колебаний струны.

Для теоретической проверки рассчитаем модель вынужденных колебаний струны со следующими параметрами. В установке использовалась стальная третья струна среднего натяжения. Диаметр струны $d = 0{,}43$ мм, объемная плотность стали $\rho_V = 7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3, соответственно линейная плотность $\rho = \rho_V \pi d^2 / 4 = 1{,}1 \cdot 10^{-3}$ кг/м. Натяжение струны взято равным $T = 10^2$ Н, коэффициент сопротивления $r = 10^{-3}$ кг/с, циклическая частота гармонической вынуждающей силы $\omega = 1{,}38 \cdot 10^3$ рад/с, длина струны $l = 0{,}5$ м, суммарная амплитуда вынуждающей силы – 50 Н. Распределение силы было таким же, как и в опыте. Результаты представлены на рисунке 2.37 в относительных единицах – сплошная линия – теоретический расчет, точки – экспериментальные данные. Как видно, получилось хорошее соответствие.

По результатам опытов видно – максимальное отклонение струны возникает, когда частота переменного тока совпадает с собственной частотой струны и вдоль струны укладывается одна полуволна.

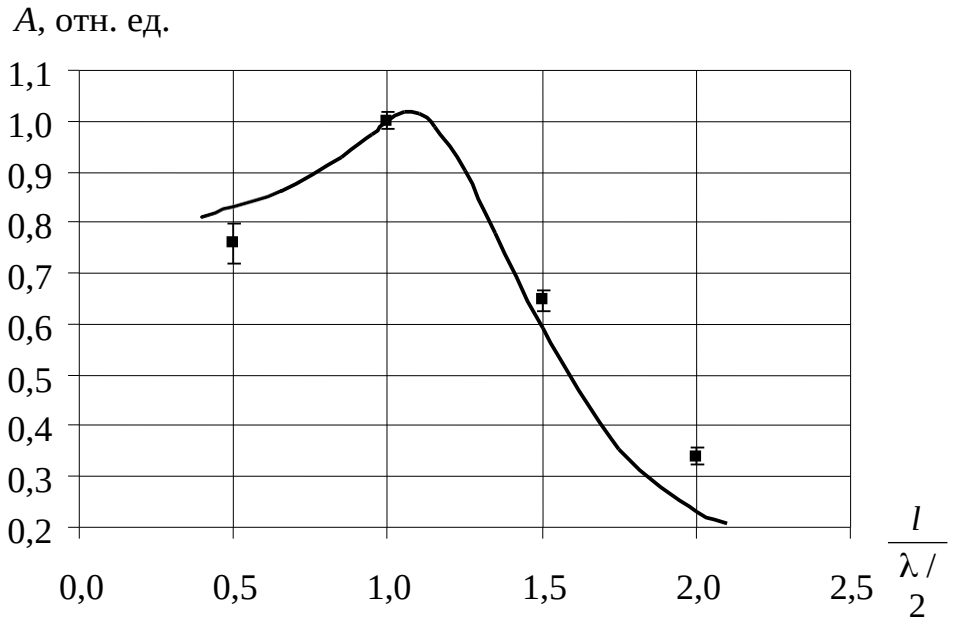


Рисунок 2.25 – Пространственный резонанс – теория и эксперимент (микрофон)

Полученные результаты можно использовать для построения новых приборов. Так как резонанс зависит от размеров колеблющейся системы и собственной частоты, то при изменении натяжение струны будет меняться только частота и по взаимодействию струны со средой можно судить о скорости распространения волн в этой среде, то есть использовать для анализа среды. Другой областью применения может быть детектирование сигналов – возбуждение акустических колебаний электромагнитной волной (электрическое поле взаимодействует с зарядом на струне, или магнитное поле – с током), также в качестве фильтра для получения сигнала с конкретными характеристиками или в шифровальной технике. В силу инертности колебаний такую систему можно использовать в качестве линии задержки. Все вышесказанное можно применить не только к струне, но и к любой системе, способной совершать акустические колебания.

При исследовании воздействия электромагнитных волн, были рассмотрены лишь некоторые виды воздействия, которые могут приводить к возбуждению колебаний систем на частотах, выше собственных частот этих систем. Это актуально при рассмотрении воздействия электромагнитных волн на биологические объекты. Так как скорости распространения акустических и электромагнитных волн сильно различаются, то невозможно простым гармоническим сигналом добиться резонанса. Для этого надо учитывать параметры как электромагнитных, так и акустических колебаний системы – то есть длины волн и частоты.

При рассмотрении вопросов взаимодействия электромагнитного излучения с тонкими пленками, следует принимать во внимание то, что связанные с этим явления имеют волновую природу. Одно из ее проявлений – это явление резонанса. Так как одной из разновидностей тонких пленок являются биологические мембраны, то косвенным доказательством этого можно считать факт реакции отдельных клеток на излучение малой интенсивности и частотный характер биологических эффектов. Очевидно, что воздействие электромагнитных волн будет максимальным, если их частота будет близка к частоте собственных колебаний тонких пленок. Для этого необходимо знать частоты собственных акустических и электромагнитных колебаний тонких пленок. В этой главе рассмотрены данные вопросы.

Для расчета акустических колебаний можно воспользоваться следующими соображениями. К тонким пленкам относится бислой – двойной молекулярный слой, формируемый полярными липидами в водной среде. [8]. В липидном бислое молекулы ориентированы таким образом, что их полярные фрагменты обращены в сторону водной фазы и формируют две гидрофильные поверхности, а неполярные "хвосты" образуют гидрофобную область внутри бислоя. Бислой – термодинамически выгодная форма ассоциации полярных липидов в водной среде. Он образует замкнутую поверхность, которая геометрически представляет собой сферу (см. рисунок 2.26).

Поверхность фосфолипидного бислоя представляет собой сложное образование. Граничащие с электролитом полярные головки фосфолипидных молекул образуют поверхностный слой (толщиной 0,6 – 1 нм), заполненный электриче-

скими зарядами и диполями. Часть этих зарядов и диполей принадлежит самим головкам, другую часть составляют молекулы воды и ионы электролита. Поэтому термины поверхностные заряды, поверхностные диполи в значительной степени условны. Заряды и диполи реальных фосфолипидных поверхностей распределены в приповерхностном слое. Как правило, считается, что толщина этого слоя пренебрежимо мала и заряды находятся на границе раздела [14].

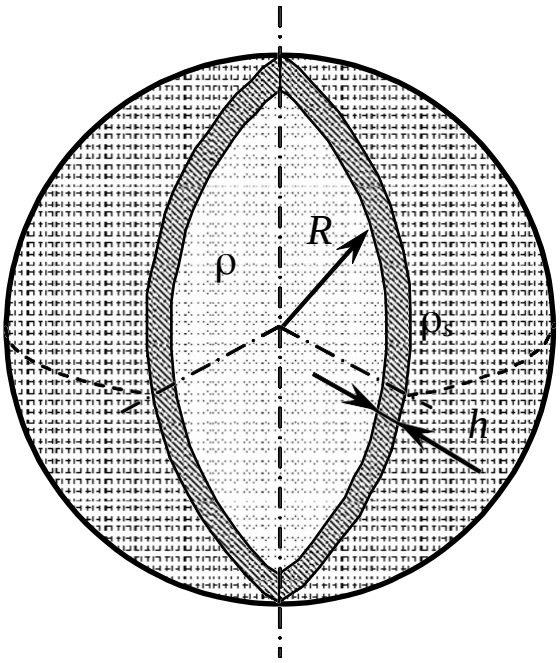


Рисунок 2.26 – Сферическая тонкая пленка

В первом приближении не учитывается взаимодействие пленки с окружающей средой, т. е. отсутствуют потери энергии на излучение, и пренебрегается вязкостью внутренней среды, т. е. отсутствуют потери энергии в системе, то энергия циклически перекачивается от пленки к внутренней среде и обратно. В этом случае необходимо рассматривать акустические импедансы [7], которые, в случае, если они чисто мнимые, являются мерой циклического обмена энергии. Поскольку энергия перекачивается без потерь, то импедансы внутренней среды и пленки должны быть равны. А так как импеданс является функцией частоты, то можно найти эти частоты.

Наиболее хорошо изучены параметры органических и искусственных фосфолипидных тонких пленок, которые обладают характеристиками, представленными в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Параметры фосфолипидных тонких пленок

Радиус пленки [61] R, м	$10^{-6} – 10^{-5}$
Толщина пленки [61] h, м	10^{-8}
Плотность внутренней среды (вода) ρ, кг/м^3	10^3
Плотность пленки [130, 138] ρ_S, кг/м^3	$10^4 \div 10^5$
Скорость распространения колебаний в воде $c_{зв}$, м/с	1450
Натяжение пленки [57] T, Н/м	0.45
Модуль упругости при двумерном растяжении в плоскости пленки [139] E, Па	$3 \cdot 10^7$
Модуль поперечной упругости пленки [139] $E_\perp$, Па	$10^5 – 10^9$

Сферические функции Бесселя, вычисленные на компьютере, совпадали с табличными данными до шестого знака после запятой. При малых и больших значениях X использовались приближенные функции для увеличения скорости вычисления. Интервалы применения приближенных функций выбирались с тем условием, чтобы вычисленные по ним значения сферических функций Бесселя не отличались от точных значений на величину больше 0,1 %.

Данные частоты являются низшими, то есть для пленки с заданными параметрами существуют и более высокие частоты.

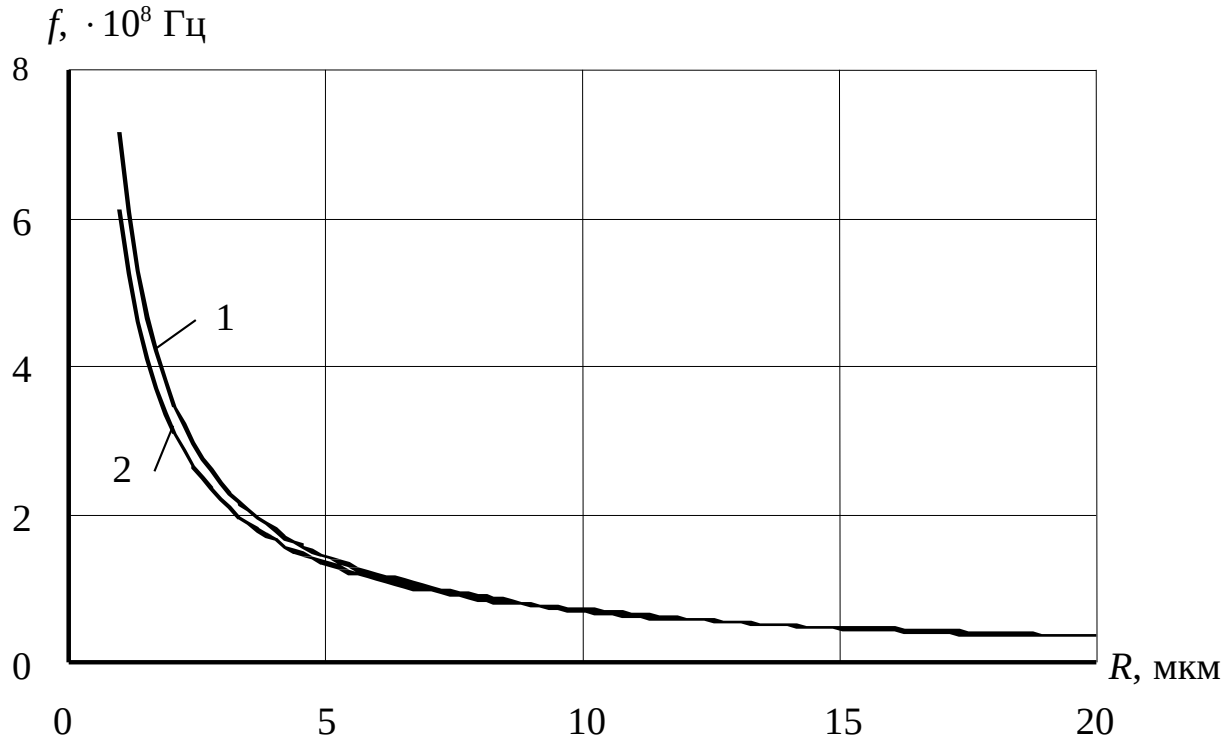


Рисунок 2.27 – Зависимость частоты колебаний от радиуса пленки
$c_{зв}$ = 1450 м/с, $\rho_s = 10^4$ кг/м^3, $\rho = 10^3$ кг/м^3 (1 – h = 1 нм, 2 – h = 20 нм)

На рисунке 2.27 представлены графики зависимости резонансных частот от радиуса пленки для двух разных размеров – первая кривая соответствует частотам

для толщины пленки h = 1 нм, а вторая кривая – для толщины пленки h = 20 нм.

Как видно из рисунка 2.27, зависимость частоты колебаний от радиуса пленки имеет гиперболический вид и мало зависит от ее толщины – тем меньше, чем больше радиус. Здесь также приведены низшие частоты, которые имеют порядок $10^7 – 10^8$ Гц.

На рисунке 2.28 представлена зависимость нижних частот акустических колебаний пленки от скорости звука во внутренней среде. Как видно из графика, эта зависимость носит линейный характер.

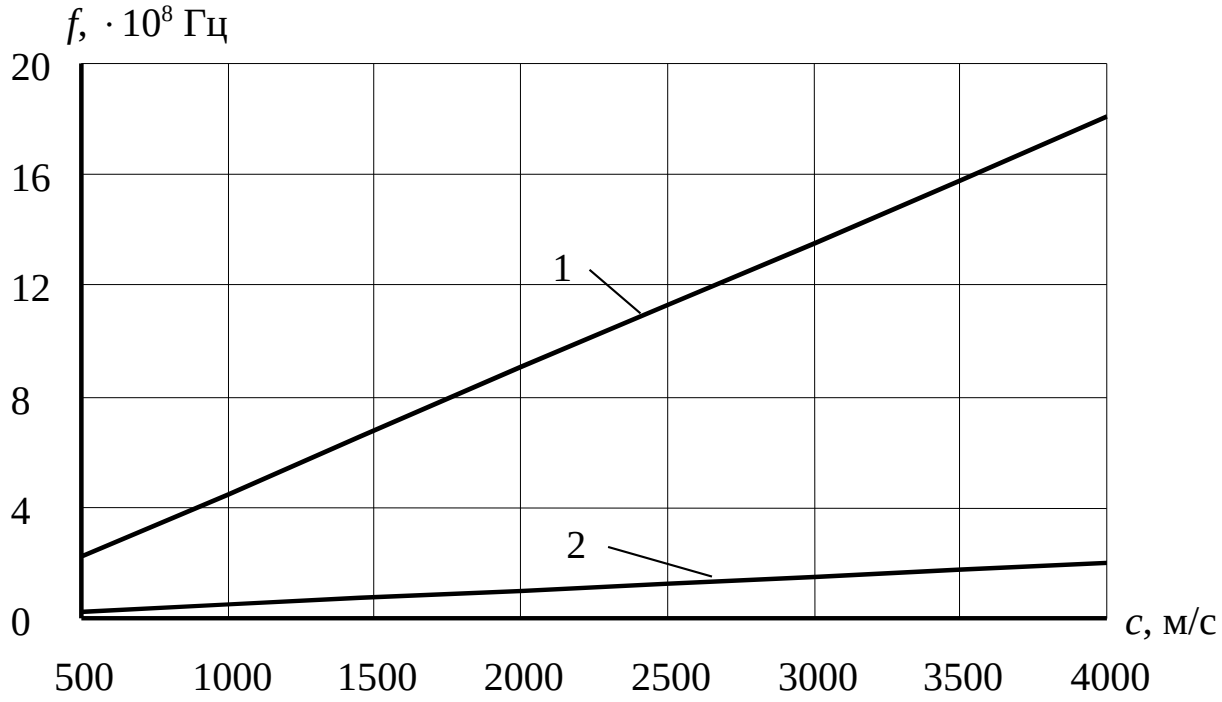


Рисунок 2.28 – Зависимость частоты колебаний от скорости звука
$\rho_s = 10^4$ кг/м^3, $\rho = 10^3$ кг/м^3, h = 10 нм (1 – R = 1 нм, 2 – R = 10 нм)

Частоты поперечных симметричных акустических колебаний пленки составляют порядка 10^9 Гц для радиуса 1 мкм и 10^8 Гц для радиуса пленки равного 10 мкм.

Зависимости частот от размеров пленки и скорости звука во внутренней среде будут такими же, как и для продольных колебаний.

Таблица 2.8 – Зависимость частоты поперечных симметричных колебаний пленки от ее размеров и модуля поперечной упругости $E_\perp$

f, Гц			
$E_\perp$, Па / *R*, мкм	10^5	10^7	10^9
1	$7{,}07 \cdot 10_{8}$ $1{,}41 \cdot 10_{9}$ $2{,}12 \cdot 10_{9}$ $2_{83 \cdot 10^9}$	$7{,}40 \cdot 10_{8}$ $1{,}43 \cdot 10_{9}$ $2{,}13 \cdot 10_{9}$ $2_{84 \cdot 10^9}$	$1{,}02 \cdot 10_{9}$ $1{,}75 \cdot 10_{9}$ $2{,}48 \cdot 10_{9}$ $3_{19 \cdot 10^9}$
10	$7{,}27 \cdot 10_{7}$ $1{,}45 \cdot 10_{8}$ $2{,}17 \cdot 10_{8}$ $2{,}89 \cdot 10_{8}$	$8{,}97 \cdot 10_{7}$ $1{,}58 \cdot 10_{8}$ $2{,}27 \cdot 10_{8}$ $2{,}97 \cdot 10_{8}$	$1{,}03 \cdot 10_{8}$ $1{,}78 \cdot 10_{8}$ $2{,}53 \cdot 10_{8}$ $3{,}26 \cdot 10_{8}$

В таблице 2.9 приведены частоты для сжимаемого вещества внутренней среды. Особенностью несимметричных колебаний пленки является то, что существует одна частота порядка 10^5 – 10^6 Гц, а остальные частоты лежат в пределе от 10^8 Гц. В таблице 3.5 приведены частоты для несжимаемого вещества внутренней среды. Разным n соответствуют разные колебания.

Таблица 2.9 – Частоты колебаний пленки различных гармоник для сжимаемого вещества внутренней среды

f, Гц							
n = 2		*n* = 3		*n* = 4		*n* = 5	
$\rho_S = 10^4$ кг/м^3	$\rho_S = 10^5$ кг/м^3	$\rho_S = 10^4$ кг/м^3	$\rho_S = 10^5$ кг/м^3	$\rho_S = 10^4$ кг/м^3	$\rho_S = 10^5$ кг/м^3	$\rho_S = 10^4$ кг/м^3	$\rho_S = 10^5$ кг/м^3

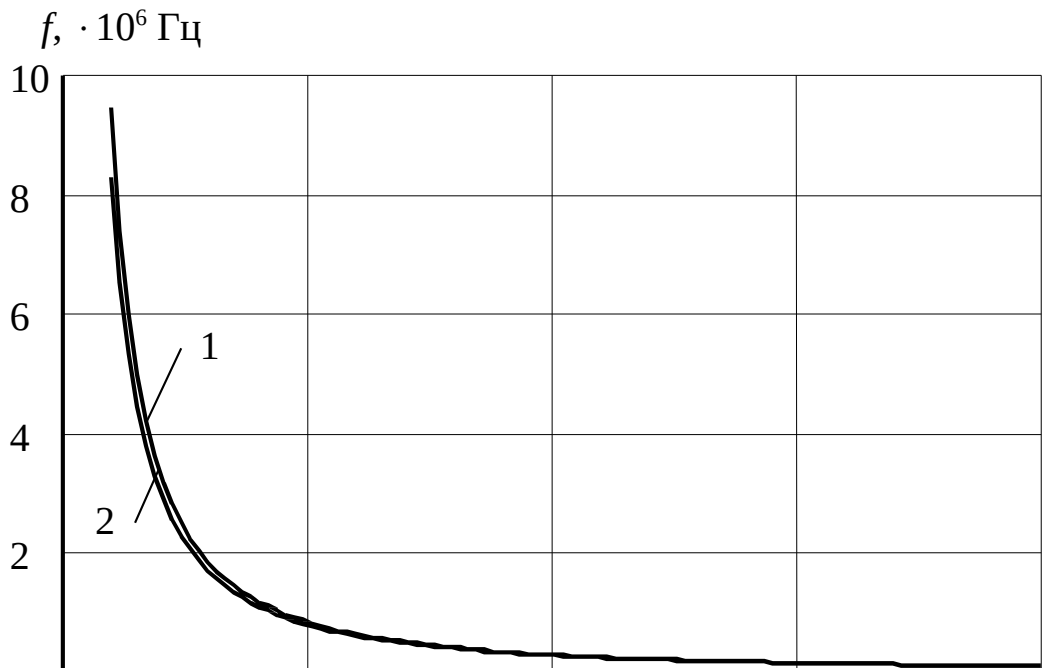
$2{,}90 \cdot 10^5$	$2{,}75 \cdot 10^5$	$5{,}76 \cdot 10^5$	$5{,}12 \cdot 10^5$	$8{,}88 \cdot 10^5$	$7{,}66 \cdot 10^5$	$1{,}23 \cdot 10^6$	$1{,}03 \cdot 10^6$
$1{,}32 \cdot 10^8$	$1{,}21 \cdot 10^8$	$1{,}59 \cdot 10^8$	$1{,}47 \cdot 10^8$	$1{,}86 \cdot 10^8$	$1{,}72 \cdot 10^8$	$2{,}14 \cdot 10^8$	$1{,}97 \cdot 10^8$
$2{,}08 \cdot 10^8$	$1{,}93 \cdot 10^8$	$2{,}37 \cdot 10^8$	$2{,}21 \cdot 10^8$	$2{,}67 \cdot 10^8$	$2{,}50 \cdot 10^8$	$2{,}97 \cdot 10^8$	$2{,}77 \cdot 10^8$

Таблица 2.10 – Частоты колебаний пленки различных гармоник для несжимаемого вещества внутренней среды

f, Гц							
$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$		$n = 5$	
$\rho_S = 10^4$ кг/м^3	$\rho_S = 10^5$ кг/м^3	$\rho_S = 10^4$ кг/м^3	$\rho_S = 10^5$ кг/м^3	$\rho_S = 10^4$ кг/м^3	$\rho_S = 10^5$ кг/м^3	$\rho_S = 10^4$ кг/м^3	$\rho_S = 10^5$ кг/м^3
$2{,}99 \cdot 10^5$	$2{,}75 \cdot 10^5$	$5{,}76 \cdot 10^5$	$5{,}12 \cdot 10^5$	$8{,}88 \cdot 10^5$	$7{,}66 \cdot 10^5$	$1{,}23 \cdot 10^6$	$1{,}03 \cdot 10^6$

Как видно из этих двух таблиц, нижние частоты акустических колебаний для сжимаемого вещества внутренней среды совпадают с частотами для несжимаемого вещества. Это объясняется тем, что при малых kR функцию Бесселя можно представить в виде степенной функции, то есть при малых частотах сжимаемая жидкость ведет себя как несжимаемая.

На рисунках приведены зависимости собственных частот акустиче- ских колебаний пленки от ее размеров. Данные зависимости носят такой же ха- рактер, как и для симметричных колебаний, т. е. частоты колебаний обратно пропорциональны радиусу пленки и практически не зависят от ее толщины.



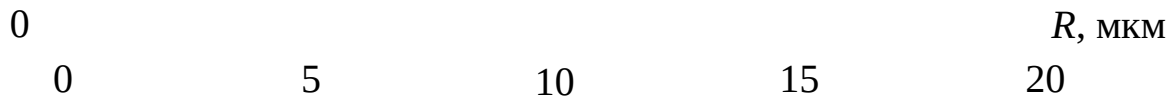


Рисунок 2.29 – Зависимость частоты колебаний от радиуса пленки $\rho_s = 10^4$ кг/м^3, $\rho = 10^3$ кг/м^3 (1 – h = 1 нм, 2 – h = 20 нм)

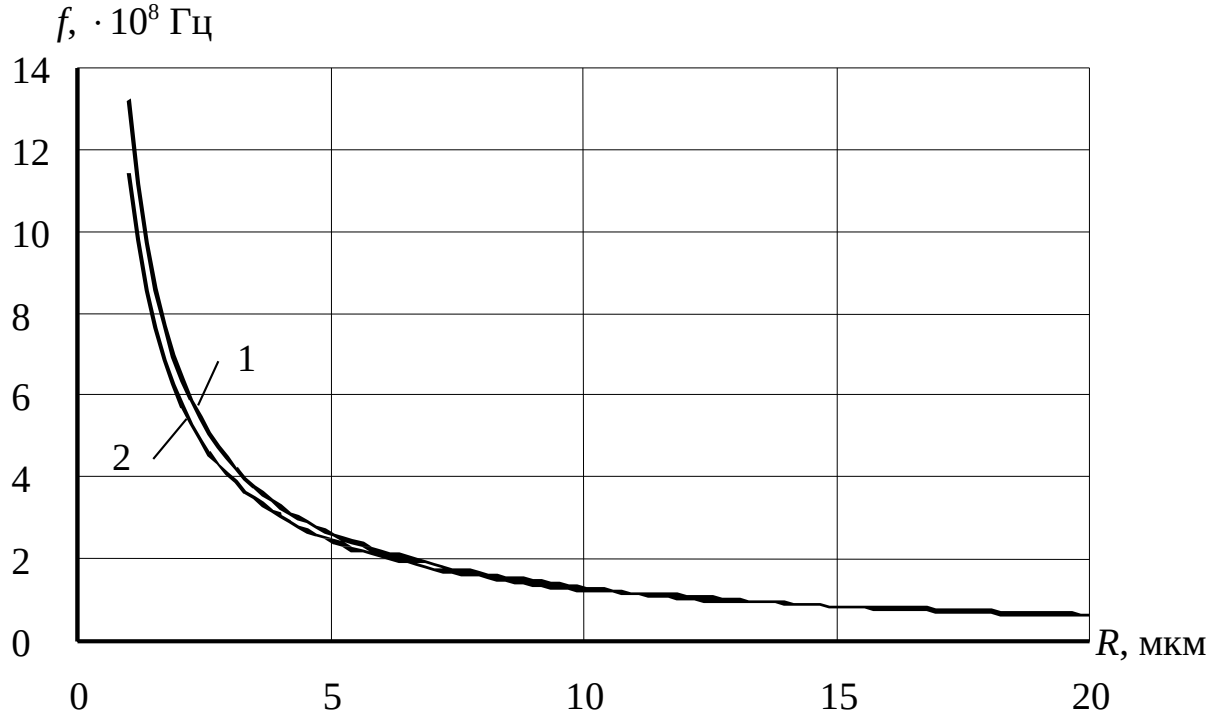


Рисунок 2.30 – Зависимость частоты колебаний от радиуса пленки c = 1450 м/с, $\rho_s = 10^4$ кг/м^3, $\rho = 10^3$ кг/м^3 (1 – h = 1 нм, 2 – h = 20 нм)

В таблице 2.11 приведены частоты для сжимаемого вещества внутренней среды для разных гармоник (n), разных значений модуля поперечной упругости пленки ($E_\perp$) и ее размеров (R). Частоты акустических колебаний лежат в диапазоне 10^7 – 10^9 Гц для радиуса пленки 1 мкм и 10^6 – 10^8 Гц для радиуса пленки 10 мкм.

Зависимости частоты поперечных несимметричных колебаний пленки от ее размеров и скорости распространения звука во внутренней среде качественно не отличаются от аналогичных зависимостей для всех других типов колебаний.

Таблица 2.11 – Зависимость частоты поперечных несимметричных колебаний пленки от ее размеров и модуля поперечной упругости $E_{\perp}$

f, Гц						
$E_{\perp}$, Па / n	10^5		10^7		10^9	
1	2	3	4	5	6	7
R, мкм	1	10	1	10	1	10
1	$1{,}57 \cdot 10^7$	$5{,}00 \cdot 10^6$	$1{,}50 \cdot 10^8$	$3{,}54 \cdot 10^7$	$4{,}62 \cdot 10^8$	$4{,}78 \cdot 10^7$
	$1{,}01 \cdot 10^9$	$1{,}04 \cdot 10^8$	$1{,}04 \cdot 10^9$	$1{,}19 \cdot 10^8$	$1{,}34 \cdot 10^9$	$1{,}37 \cdot 10^8$
	$1{,}74 \cdot 10^9$	$1{,}78 \cdot 10^8$	$1{,}75 \cdot 10^9$	$1{,}89 \cdot 10^8$	$2{,}08 \cdot 10^9$	$2{,}12 \cdot 10^8$
	$2{,}48 \cdot 10^9$	$2{,}53 \cdot 10^8$	$2{,}49 \cdot 10^9$	$2{,}62 \cdot 10^8$	$2{,}82 \cdot 10^9$	$2{,}88 \cdot 10^8$
	$3{,}18 \cdot 10^9$	$3{,}26 \cdot 10^8$	$3{,}19 \cdot 10^9$	$3{,}33 \cdot 10^8$	$3{,}53 \cdot 10^9$	$3{,}60 \cdot 10^8$
2	$2{,}39 \cdot 10^7$	$7{,}08\text{E} \cdot 10^6$	$2{,}13 \cdot 10^8$	$5{,}38 \cdot 10^7$	$7{,}37 \cdot 10^8$	$7{,}68 \cdot 10^7$
	$1{,}30 \cdot 10^9$	$1{,}33 \cdot 10^8$	$1{,}32 \cdot 10^9$	$1{,}47 \cdot 10^8$	$1{,}64 \cdot 10^9$	$1{,}68 \cdot 10^8$
	$2{,}05 \cdot 10^9$	$2{,}10 \cdot 10^8$	$2{,}06 \cdot 10^9$	$2{,}20 \cdot 10^8$	$2{,}46 \cdot 10^9$	$2{,}51 \cdot 10^8$
	$2{,}83 \cdot 10^9$	$2{,}89 \cdot 10^8$	$2{,}84 \cdot 10^9$	$2{,}97 \cdot 10^8$	$3{,}18 \cdot 10^9$	$3{,}24 \cdot 10^8$
	$3{,}54 \cdot 10^9$	$3{,}62 \cdot 10^8$	$3{,}54 \cdot 10^9$	$3{,}68 \cdot 10^8$	$3{,}89 \cdot 10^9$	$3{,}97 \cdot 10^8$
3	$3{,}20 \cdot 10^7$	$8{,}68 \cdot 10^6$	$2{,}60 \cdot 10^8$	$6{,}91 \cdot 10^7$	$9{,}90 \cdot 10^8$	$1{,}04 \cdot 10^8$
	$1{,}57 \cdot 10^9$	$1{,}61 \cdot 10^8$	$1{,}59 \cdot 10^9$	$1{,}73 \cdot 10^8$	$1{,}93 \cdot 10^9$	$1{,}98 \cdot 10^8$
	$2{,}48 \cdot 10^9$	$2{,}53 \cdot 10^8$	$2{,}49 \cdot 10^9$	$2{,}62 \cdot 10^8$	$2{,}82 \cdot 10^9$	$2{,}88 \cdot 10^8$
	$3{,}18 \cdot 10^9$	$3{,}26 \cdot 10^8$	$3{,}19 \cdot 10^9$	$3{,}33 \cdot 10^8$	$3{,}53 \cdot 10^9$	$3{,}60 \cdot 10^8$
	$3{,}89 \cdot 10^9$	$3{,}98 \cdot 10^8$	$3{,}90 \cdot 10^9$	$4{,}04 \cdot 10^8$	$4{,}24 \cdot 10^9$	$4{,}33 \cdot 10^8$
4	$4{,}08 \cdot 10^7$	$1{,}00 \cdot 10^7$	$2{,}99 \cdot 10^8$	$8{,}26 \cdot 10^7$	$1{,}23 \cdot 10^9$	$1{,}30 \cdot 10^8$
	$1{,}84 \cdot 10^9$	$1{,}88 \cdot 10^8$	$1{,}86 \cdot 10^9$	$2{,}00 \cdot 10^8$	$2{,}21 \cdot 10^9$	$2{,}46 \cdot 10^8$
	$2{,}83 \cdot 10$	$2{,}89 \cdot 10^8$	$2{,}84 \cdot 10^9$	$2{,}97 \cdot 10$	$2{,}46 \cdot 10^9$	$3{,}45 \cdot 10^8$

	$3{,}54 \cdot 10^{9}$	$3{,}62 \cdot 10^{8}$	$3{,}55 \cdot 10^{9}$	$3{,}68 \cdot 10^{8}$	$3{,}18 \cdot 10^{9}$	$4{,}24 \cdot 10^{8}$
	$4{,}25 \cdot 10^{9}$	$4{,}34 \cdot 10^{8}$	$4{,}25 \cdot 10^{9}$	$4{,}40 \cdot 10^{8}$	$3{,}89 \cdot 10^{9}$	$5{,}00 \cdot 10^{8}$

Учет вязкости дает новую частоту [130]:

$$\omega^2 = \left| -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{\left(\frac{4}{3}\eta + \lambda\right)^2}{\rho^2 c_{зв}^4}\omega_0^2} \right| \frac{\left(\frac{4}{3}\eta + \lambda\right)^2}{2\rho^2 c_{зв}^4}.$$

Проанализируем это выражение. Вязкость воды при комнатной температуре – величина порядка 10^{-3} Па·с, коэффициент трения расширения имеет тот же порядок [14]. Как известно, в системе с потерями частота колебаний меньше, чем в системе без потерь [14], поэтому частоту ω можно принять порядка 10^8 Гц. Тогда:

$$\sqrt{\frac{\omega^2}{4\rho 2c^4}\left|\frac{4}{3}\eta+\lambda\right|^2-1}\approx\sqrt{\frac{10^{16}\,\text{с}^{-2}}{10^{6}\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^2}\,10^{12}\,\frac{\text{м}^4}{\text{с}^4}}10^{-6}\,\frac{\text{кг}^2}{\text{с}^2\text{м}^2}-1}=$$

$$=\sqrt{10^{-8}-1}=\sqrt{-1}=i.$$

Теперь из уравнения найдем новую частоту колебаний:

$$\omega^2=\frac{-\frac{1}{2}+\sqrt{\frac{1}{4}+\frac{\left(\frac{4}{3}\eta+\right)^2}{\rho^2 c}\omega_0^2}}{\frac{\left(\frac{4}{3}\eta+\lambda\right)^2}{2\rho^2c^4}}\approx\frac{-1+\sqrt{1+2\cdot10^{-24}\cdot\omega_0^2}}{10^{-24}}\approx$$

$$\approx\frac{-1+1+10^{-24}\cdot\omega_0^2}{10^{-24}}=\omega_0^2.$$

Таким образом, частота колебаний пленки не зависит от вязкости внутренней среды.

Представим пленку в виде сферического резонатора с идеально проводящими стенками и заполненного изотропным диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $1 \le \varepsilon \le 81$. Радиус ~ 10 мкм (рисунок 2.31) [13].

Найдем частоты собственных электромагнитных колебаний для области, ограниченной этой пленкой.

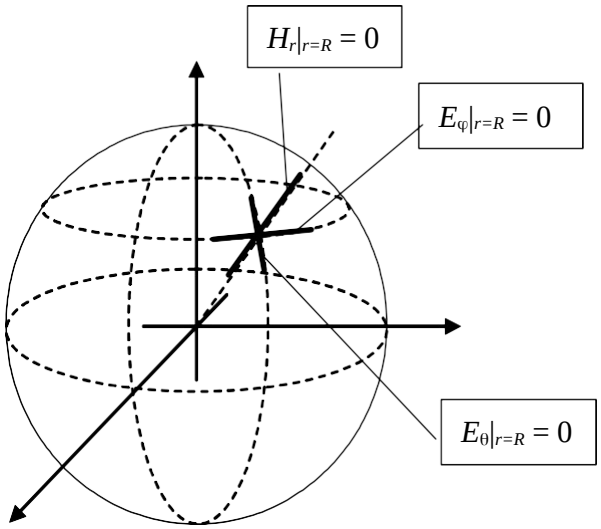


Рисунок 2.31 – Резонаторная модель сферической пленки

Так как стенки резонатора – проводники, то можно записать следующие граничные условия [14]:

$$H_r\big|_{r=R} = E_\theta\big|_{r=R} = E_\varphi\big|_r = 0$$

– нормальная составляющая магнитного поля и тангенциальная составляющая электрического поля на границе «проводник – диэлектрик» должны отсутствовать.

Исходя из этих условий, и зная вид этих функций, можно найти резонансные частоты данного резонатора.

1) В первом приближении мы приняли границы пленки проводящей поверхностью. Как было показано в ряде работ ([15 – 17]) это можно объяснить тем, что как для органических, так и искусственных пленок находятся заряды – различные ионы (Na^+, K^+, Cl^- и т. д.).

Исходя из этих условий обычно представляют органическую пленку (мембрану) как конденсатор. Но из этих же условий можно представить пленку в качестве электрического резонатора, ограниченного проводящей поверхностью. Ионный раствор не влияет на размеры полости резонатора, так как его толщина у поверхности пленки не превышает 10 нм [18].

Для упрощения задачи не учитывались потери на диэлектрике и проводнике, не учитывалась анизотропная природа внутренней среды пленки.

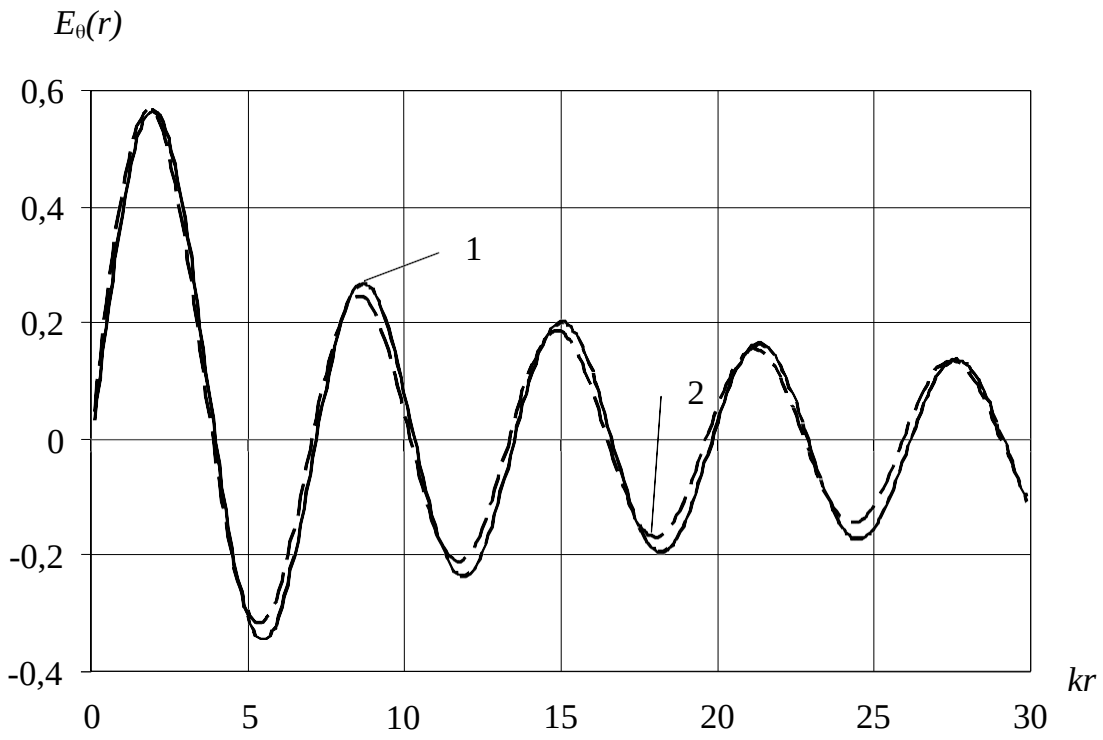


Рисунок 2.32 – Сравнительные графики функций

Чем меньше частоты акустических и электромагнитных колебаний отличаются друг от друга, тем они эффективнее будут взаимодействовать. Так как частота электромагнитной волны больше акустической, то чтобы ее уменьшить, можно возбуждать электромагнитные колебания не в пленке, а в большем объеме. При этом частоты будут ближе друг к другу, а длина электромагнитной волны больше, что не сильно повлияет на амплитуду колебаний (рисунки 2.17, 2.18). Так для пленки возможно возбуждение колебаний вида $n = 1$ – сила действует вдоль одного направления (соответственно длина волны много больше размера пленки), а внешняя и внутренняя стороны пленки колеблются в противофазе, не меняя своей формы.

На рисунке 2.33 представлена зависимость амплитуды вынужденных колебаний от длительности импульса вынуждающей силы. При интенсивности непрерывной гармонической волны порядка 10 мВт/см^2 ($E(R) = 10^2$ В/м), амплитуда колебаний будет меньше 0,1 нм, но для коротких импульсов можно увеличивать интенсивность не вызывая тепловых эффектов, поэтому на рисунке $E(R) = 10^4$ В/м. Как можно видеть, амплитуда колебаний для любой длительности импульса ($0 < \tau < T$) намного больше амплитуды колебаний для гармонической вынуждающей силы ($\tau = T$). Таким образом, импульсные электромагнитные колебания какой-то системы могут возбудить акустические колебания этой системы, если частота следования импульсов равна собственной частоте акустических колебаний системы, а длительность импульса не играет большой роли [3].

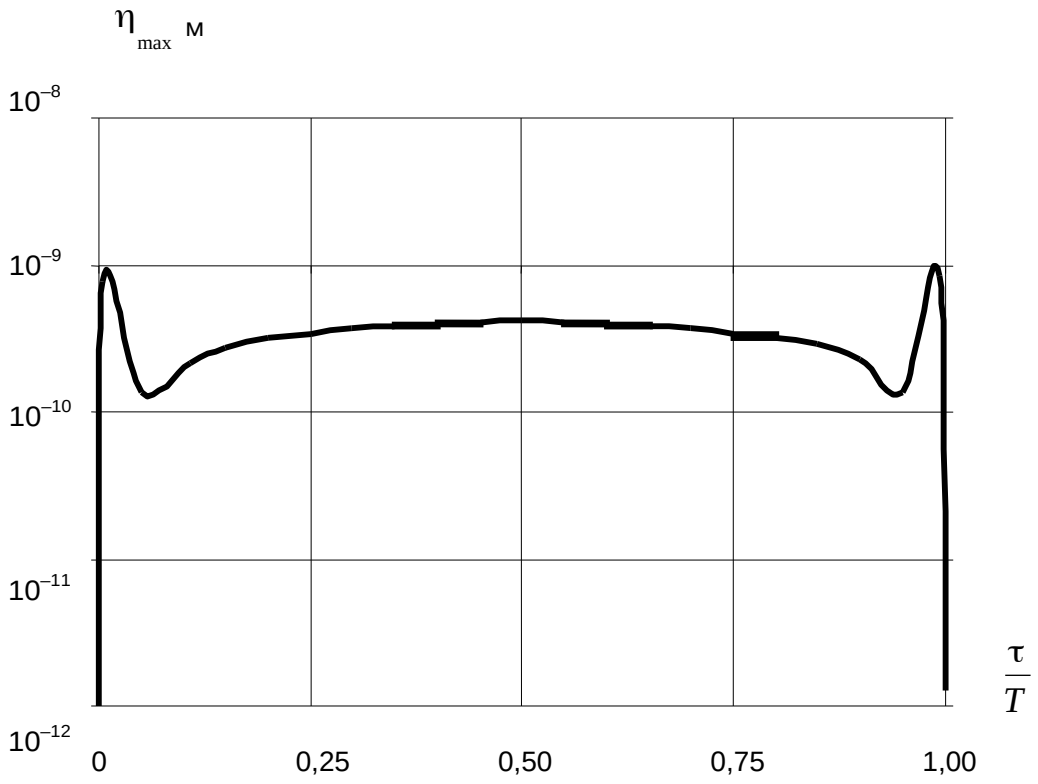


Рисунок 2.33 – Зависимость амплитуды колебаний от длительности импульса

На границе пленки с водой возникает двойной электрический слой. Если рассматривать пленку как мембрану, то с внешней и внутренней стороны находятся известные заряды разных знаков [18]. Механические колебания бислоя и, соответственно, заряда могут создавать переменные поля в соответствии с законами электродинамики [12].

Органические тонкие пленки постоянно обменивается информацией. Она может передаваться как непосредственно, при их соприкосновении, так и на расстоянии. Такие взаимодействия называются дистантными. Они могут осуществляться посредством молекул и излучаемых электромагнитных волн, несущих информацию (в частности, для клеток) [11 – 13]. В настоящее время накоплено достаточно фактов, свидетельствующих о том, что на основе дистантных межклеточных взаимодействий строится не только развитие многоклеточного организма (которое и начинается с взаимодействия двух клеток – гамет), но и его жизнедея-

тельность как целого. Практически все регуляторные механизмы в многоклеточном организме функционируют посредством взаимодействия клеток. Межклеточные взаимодействия на разных этапах индивидуального развития многоклеточного организма выступают как ведущий механизм формирования клеточных систем, обладающих пространственно-временной упорядоченностью, и являются ведущим фактором системогенеза в клеточных ассоциациях. Накопленные в последние годы данные о существенной структурно-функциональной гетерогенности клеточных популяций, которые ранее считались достаточно однородными (миокардиоциты желудочков сердца, гепатоциты печени и т. п.), ставят вопрос о том, что кооперативное поведение этих клеточных систем, по-видимому, строится на базе межклеточных взаимодействий. Поэтому большой интерес представляет изучение генерации электромагнитных волн, переносящих информацию.

В [13] установлено, что при наличии оптического канала связи через тонкие слюдяные и кварцевые пластины между двумя изолированными тканевыми культурами существует дистантное взаимодействие, выражающееся в повторении морфологических признаков цитопатологического процесса, индуцированного в одной из культур с помощью вирусов, двухлористой ртути и УФ-облучения в другой – интактной культуре ткани. Это явление обозначено как «зеркальный» цитопатический эффект.

При применении ингибиторов клеточного цикла (колцемид) был получен в «зеркальной» культуре тот же процесс метафазного блока, что и в камере-индукторе. Эта модель уже иного толка, так как здесь идет передача информации не о гибели клеток монослоя, а об изменении клеточного цикла.

Описанное явление обнаружено при взаимодействии всех исследованных первичных и перевиваемых гомологичных клеточных культур. В данном случае обмен информацией происходил посредством электромагнитных волн в оптическом диапазоне. Энергия квантов была настолько мала, что они не засекались приборами, однако клетки их воспринимали. Еще одной особенностью является то, что данный эффект гораздо лучше проявлялся в темноте, чем на свету. Оче-

видно, что кроме оптического диапазона, могут существовать каналы связи клеток, лежащие в других диапазонах.

Механические колебания любой пленки можно возбуждать как механическим способом (путем воздействия звуковой волной [14]), так и электромагнитным (воздействие импульсной электромагнитной волной [13]). Также в [17] эмпирически показано, что живая клетка и без внешнего воздействия совершает акустические колебания. Так как акустические колебания зависят от состояния клетки, то, зная параметры этой волны, можно узнать и параметры колебаний клетки. Также это может быть использовано для преобразования сигнала.

В [13] показано, что существование акустических волн находится в соответствии с экспериментальными данными, свидетельствующие о присутствии волн, чья скорость соответствует скорости акустических волн в клетках, подвергнутых КВЧ излучению. В [14] было установлено экспериментально, что волны возбуждались в клеточных мембранах. В [18] это заключение было подтверждено теоретическим анализом, выполненным с использованием реальных физических параметров клеточных мембран. Но клеточные мембраны живых клеток поляризованы, так как между внешними и внутренними поверхностями мембран имеется разность потенциалов, определяемая существованием электрического поля.

Распространение акустических волн вдоль мембраны вызывают периодические изменения толщины мембраны. Пространственный период изменения толщины мембраны равен длине акустической волны. В поляризованных диэлектрических (липидных) мембранах такие изменения толщины сопровождаются изменениями электрического поля, имеющими ту же периодичность что и у акустических волн.

Поэтому, в применении к поляризованным мембранам живых организмов, более правильно говорить не об акустических и электрических волнах отдельно, а об акустоэлектрических волнах. Когда длина этих волн незначительно меньше по сравнению с длиной волны электромагнитных волн, изменения электрической компоненты вызывают, как было упомянуто выше, превращение этой энергии не в энергию магнитного поля, а в упругие деформации.

В работах [16] также рассматриваются вопросы генерации электромагнит-

ных волн биологическими объектами и межклеточных взаимодействий. Спектральный излучаемых волн диапазон широк; от кГц до видимой части электромагнитного спектра. В диапазоне 10^{-2} – 10^{4} Гц на расстояниях от 1 мм до 1 м от поверхности тела регистрируются электрические поля, источником которых является биоэлектрическая деятельность соответствующих органов и тканей человека. С частот порядка 10^{9} – 10^{10} Гц начинается собственное тепловое СВЧ радиоизлучение тела человека [9].

Тонкая пленка совершает акустические колебания двух типов: продольные (толщина пленки не меняется) и поперечные (связаны с изменением толщины пленки). На внешней и внутренней сторонах пленки расположены заряды различных знаков, которые колеблются вместе с мембраной. В этом случае саму мембрану можно представить как набор диполей [14], расположенных близко друг от друга и колеблющихся с частотой акустических колебаний (рисунок 2.34).

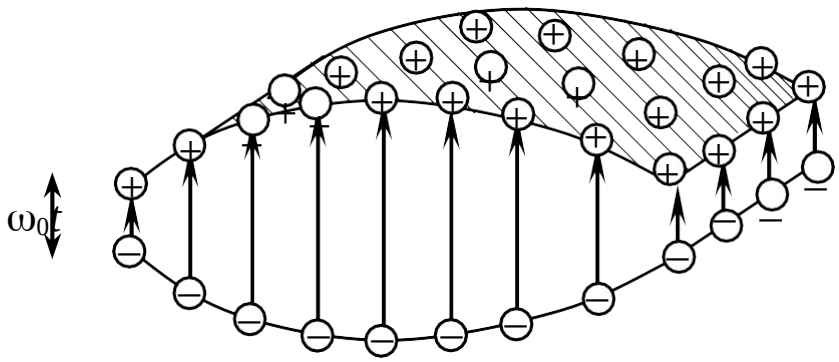


Рисунок 2.34 – Представление пленки в виде набора колеблющихся диполей

Такой набор диполей может излучать электромагнитные волны (разумеется, это касается только поперечных колебаний, поскольку при продольных колебани- ях дипольный момент каждого из колеблющихся диполей не изменяется).

Заключение

Как было показано, даже простейшие модели и использование известных законов механики, электродинамики, акустики, теории колебаний и волн, могут дать необычные результаты – неочевидное влияние силы трения, ухудшение эффектов при увеличении мощности (вибрационные эффекты), преимущество импульсного возбуждения акустических колебаний перед непрерывным, преимущество синхро-низации слабым сигналом. Все рассмотренные вопросы можно рассматривать как некоторые пути в сложном вопросе исследования взаимосвязи электромагнитных и акустических колебаний в тонких пленках, а также как пищу для дальнейших рас-суждений.

В ходе выполнения научной работы были получены следующие результаты:

- рассмотрены теоретические особенности электромагнитных и акустических резонансных явлений;
- представлены основы исследований электромагнитных и акустических резонансных явлений
- реализованы исследование электромагнитных и акустических резонансных явлений в тонких пленках;
- смоделированы электромагнитные и акустические резонансные явления в тонких пленках.

Также предложенный способ возбуждения акустических колебаний может применяться не только в тонких пленках, но и в любых других колебательных сис-темах, подверженных воздействию электромагнитных волн.

Список использованных источников

1. Nicolini, C. From neural chip and engineered biomolecules to bioelectronic devices: an overview / C. Nicolini // Biosensors and Bioelectronics. – 2020. – 10(1-2) – P. 105 – 127.

2. A Framework for Bioelectronics: Discovery and Innovation. National Institute of Standards and Technology. – 2019. – p. 42.

3. Owens, R. Organic bioelectronics – Novel applications in biomedicine / R. Owens, P. Kjall, A. Richter-Dahlfors, F. Cicoira // Biochimica et Biophysica Acta. – 2018. – 1830 (9) – P. 4283 – 4285.

4. Alessandrini, A. Single-metalloprotein wet biotransistor / A. Alessandrini, M. Salerno // Applied Physics Letters. – 2019. – 86 – P. 133902.

5. Moon, J-M. Conducting polymer-based electrochemical biosensors for neurotransmitters: A review / J-M. Moon, N. Thapliyal, K. K. Hussain, R. N. Goyal, Y-B. Shim // Biosensors & Bioelectronics. – 2018. – 102. – P. 540 – 552.

6. Gulyaev, Y. V. Acoustoelectronics: History, present state, and new ideas for a new era / Y. V. Gulyaev, F. S. Hickernell // Acoustical Physics. – 2021. – 51(1). – P. 81 – 88. doi.org/10.1134/1.1851632

7. Алексеев, С. Г. Некоторые тенденции развития акустоэлектроники сверхвысоких частот / С. Г. Алексеев, Ю. В. Гуляев, И. М. Котелянский, Г. Д. Мансфельд // Успехи физических наук. – 2019. – №8. – С. 895 – 899.

8. Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов. под ред. С. В. Калюжного. – М.: Физматлит. – 2018. – 528 с.

9. Frohlich, H. Coherent electric vibrations in biological systems and the cancer problem / H. Frohlich // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques – 2018. – 26 (8) – P. 613 – 618.

10. Девятков, Н. Д. О механизме воздействия электромагнитных излучений миллиметрового диапазона нетепловой интенсивности на жизнедеятельность организмов / Н. Д. Девятков, М.Б. Голант // Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты. – М.: ИРЭ. –

2020. – С. 18 – 33.

11. Лошицкий, П.П. Взаимодействие биологических объектов с физическими факторами / П.П. Лошицкий. – Киев: НТУ «Киевский политехнический институт». 2019. – 272 с.

12. Давыдов, Б. И. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений / Б. И. Давыдов, В. С. Тихончук, В. В. Антипов. М.: Энергоиздат, 2018. – 169 с.

13. Исмаилов, Д. Ш. Биофизическое действие СВЧ-излучений / Д. Ш. Исмаилов. М.: Энергоатомиздат, 2017. – 143 с.

14. Бецкий, О. В. Миллиметровые волны в биологии / О. В. Бецкий, М. Б. Голант, Н. Д. Девятков. М.: Знание. 2018. – 64 с.

15. Павлов, А.Н. Воздействие электромагнитных излучений на жизнедеятельность: Учебное пособие / А.Н. Павлов. М.: Гелиос АРВ. 2022.– 224с.

16. Бецкий, О. В. Биологические эффекты миллиметрового излучения низкой интенсивности / О. В. Бецкий, А. В. Путвинский // Радиоэлектроника. – 2020. – № 10. – С. 4 – 10.

17. Pelling, A. E. Local Nanomechanical Motion of the Cell Wall of Saccharomyces cerevisiae/ A. E. Pelling, S. Sehati, E. B. Gralla, J. S. Valentine, J. K. Gimzewski // Science 2019. – 305. – 5687. – P. 1147–1150.

18. Cifra, M. Electromagnetic cellular interactions / M. Cifra, J. Z. Fields, A. Farhadi // Progress in Biophysics and Molecular Biology. – 2019. – 105. – P. 223 – 246.

19. Someya, T. The rise of plastic bioelectronics / T. Someya, Z. Bao, G.G. Malliaras // Nature. – . 2019. – 540(7633). – P. 379 – 385. doi: 10.1038/nature21004.

20. Feron, K. Organic Bioelectronics: Materials and Biocompatibility / K. Feron, R. Lim, C. Sherwood, A. Keynes, A. Brichta, P.C. Dastoor // International Journal of Molecular Sciences. – 2018. – 19(8). –2382. doi: 10.3390/ijms19082382.

21. Cui, Y. Wireless Biological Electronic Sensors / Y. Cui // Sensors. – 2017. – 17. – 2289.

22. Löffler, S. Organic bioelectronics in medicine / S. Löffler, K. Melican, K.P.R. Nilsson, A. 4. Richter-Dahlfors // J Intern Med. – 2017. – 282(1). –P. 24 – 36. doi:

10.1111/joim.12595.

23. Kharlanov, A. V. Forced Acoustic Oscillations of Biological Cell / A. V. Kharlanov // Bioelectromagnetics. – 2017. – Dec; – 38(8) – P. 613 – 617. – Epub 2017 Aug 24.

24. Харланов, А. В. Возможный механизм резонансного воздействия электромагнитных волн на биологические объекты / А. В. Харланов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2017. – № 5. – С. 10 – 14.

25. Harlanov, A. V. Pulse excitation of acoustic oscillations of a cell / A. V. Harlanov // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS). 2010 5th International Conference on. – 2020. – P. 206 – 208.

26. Быстров, В. С. Динамика систем с водородными связями / В. С. Быстров // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2020. – № 3. – С. 34 – 40.

27. Крыницкая, А. Ю. Структурно-функциональное воздействие электромагнитных излучений высоких частот на гидролитический ферментный препарат / А. Ю. Крыницкая, В. С. Гамаюрова, П. П. Суханов // Биомедицинская радиоэлектроникаю. – 2020. – №10. – С. 27 – 33.

28. Aksyonov, S. I. Mechanisms of hydration effects on the structural- dynamic and functional characteristics of photosynthetic membranes in various purple bacteria / S.I. Aksyonov, P.P. Knox, A.A. Kononenko, S.K. Chamorovsky, A.B. Rubin // Eur. Biophys. J. – 2021. – 26. – P. 461 – 470.

29. Киричук, В. Ф. Влияние электромагнитного излучения терагерцевого диапазона на частотах оксида азота на постстрессорные нарушения состава углеводного компонента и активности гликопротеидных рецепторов тромбоцитов / В. Ф. Киричук, А. Н. Иванов, Е. В. Андронов, С. В. Свистунов, А. П. Креницкий, А. В. Майбородин // Биомедицинская радиоэлектроникаю. – 2020. – №5. – С. 39 – 47.

30. Бородин, И. Ф. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве / И.Ф. Бородин, Г.А. Шарков, А.Д. Горин. М., ВНИИТЭИагропром. 2017. – 55 с.

31. Влияние СВЧ-излучений на организм человека и животных / Под. ред. Петрова И.Р. – Л.: Медицина. 2020. – 176 с.