

ОСНОВНОЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Шорохов Владимир Васильевич

УДК 577.35:537.868:619.85

МЕХАНИЗМ СЛУХОВОГО ЭФФЕКТА ИМПУЛЬСНЫХ ПОЛЕЙ СВЧ

03.00.08 - Биофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 1988

Работа выполнена в Институте биологической физики АН СССР

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор Сарванли А.П.
кандидат биологических наук Тигранян Р.Э.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Каршин Л.П.
кандидат физико-математических наук Фрейдлин А.А.

Ведущая организация - Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, г. Ленинград

Защита диссертации состоится " " 1989 г.
в часов на заседании специализированного совета К 063.91.10 при Московском физико-техническом институте по адресу: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9, МФТИ.

О диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ.

Автореферат разослан " " 1988 г.

Ученый секретарь специализированного совета
кандидат физико-математических наук *М. П. Скачков* М.П. Скачков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации связана с необходимостью поиска механизма (механизмов) биологического действия импульсных электромагнитных полей (ЭМП) сверхвысокой частоты (СВЧ). Такая необходимость обусловлена широким распространением в последние десятилетия средств связи, радиолокационных систем и промышленных установок СВЧ, работающих в импульсном, или прерывистом режиме, и достоверными данными о биологическом действии, как вредном, так и благотворном, ЭМП вообще.

Одним из ярких проявлений биологического действия импульсных ЭМП СВЧ является слуховой эффект (эффект радиозвука) - возникновение слуховых ощущений при облучении головы человека импульсно-модулированным (ИМ) СВЧ-полем. Радиозвук - один из немногих объективно регистрируемых и стабильно воспроизводимых биологических эффектов электромагнитного излучения (ЭМИ), проявляющийся на целостном организме. Несмотря на тридцатилетнюю историю исследований и большое количество накопленного феноменологического материала, до сих пор нет целостной непротиворечивой концепции относительно механизма его возникновения. Изучение эффекта с привлечением добровольцев сталкивается с известными трудностями вследствие субъективной оценки слуховых ощущений испытуемыми, а также существенными ограничениями параметров излучения по соображениям безопасности. Исследования радиозвука на лабораторных животных связаны с решением проблемы экстраполяции полученных результатов на человека. В настоящей работе, в качестве основного метода, применен метод физического моделирования, позволяющий обойти указанные трудности.

Цель работы - исследование механизма слухового эффекта импульсных полей СВЧ методом физического моделирования.

Основные задачи исследования:

1. Обосновать правомочность рассмотрения цилиндрических и сферических резонаторов, заполненных поглощающей жидкостью, в качестве физических моделей эффекта радиозвука и исследовать их свойства в приложении к данному явлению.

2. Определить роль костного проведения звука и резонансных свойств головы человека в формировании слухового ощущения при восприятии радиозвука.

3. Сформулировать физические основы концепции механизма ра-

диозвука, объясняющей частотные и пороговые характеристики слухового ощущения, возбуждаемого при действии импульсов ЭМИ на голову человека.

4. В натурном и модельном экспериментах определить степень соответствия предложенной модели реальному прототипу.

Научная новизна. - Исследованы процессы возбуждения и основные характеристики механических колебаний, возбуждающихся в жидкостных резонансных моделях при действии импульсов ЭМИ и являющихся основой механизма возникновения слуховых ощущений при облучении головы человека ИМ ЭМП. Установлена единая природа высокочастотного и низкочастотного "типов" радиозвука.

- Методом аудиометрии слуховых порогов по костному проведению исследованы пороги чувствительности слуха в области частот 4 - 12 кГц. Показано, что при малом шаге по частоте (200 Гц), выявляются некоторые особенности аудиограмм, которые отсутствуют в аудиограммах, полученных традиционными методами, использующими октавный шаг. Показано также, что аудиограммы формируются под влиянием резонансных свойств анатомических структур головы, которая может быть представлена в виде сложной системы связанных акустических резонаторов.

- Сформулированы основы концепции механизма эффекта радиозвука как явления, имеющего физическую природу, состоящую в преобразовании падающей энергии ЭМИ в акустическую и окончательном формировании слухового ощущения многоконтурной (многомодовой) системой связанных акустических резонаторов, на уровне рецепторного аппарата органа слуха.

- В натурном эксперименте методом нулевых биений показана принципиальная возможность восприятия радиозвука во всем звуковом диапазоне частот.

Практическая ценность. Результаты, полученные в работе, могут быть полезны для понимания механизмов биологического действия импульсных полей СВЧ, роли термоэластического преобразования энергии в биологических эффектах и, наконец, как пример исследования конкретного явления и поиска его механизма методом физического моделирования.

Метод физического моделирования применим и к изучению других эффектов ИМ ЭМИ, поскольку отражает физическую сущность происходящих явлений при взаимодействии ЭМИ с биологической тканью.

Метод аудиометрии слуховых порогов по костному проведению с использованием малого шага по частоте, позволяет обнаруживать тонкие индивидуальные особенности как слуховой системы человека, так и резонансных свойств его головы, что открывает новые возможности в диагностике нарушений слуха.

Явление радиозвука можно использовать в качестве объективного критерия, в соответствующем диапазоне частот, для определения возможного неблагоприятного действия ЭМИ на человека. Наличие звуковых ощущений при импульсной модуляции излучения, однозначно свидетельствовало бы о наличии воздействия ЭМП данной интенсивности на организм.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на Всесоюзном рабочем совещании "Биологическое действие неионизирующих электромагнитных излучений", май 1986 года, на Конференции молодых ученых Института биологической физики АН СССР 1986 года и на Секции Ученого совета ИБФ АН СССР по проблеме "Физическая среда" в мае 1987 года.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ в виде статей в научных журналах и сборниках.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы (глава I), описания методик, результатов экспериментов и их обсуждения (главы 2 - 5), заключения, выводов и описки литературы из 145 названий. Работа изложена на 109 страницах машинописного текста и содержит 29 рисунков и 3 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Обзор литературы. Поскольку в отечественной литературе нет публикаций достаточно полно отражающих состояние проблемы, обзор литературы сделан довольно подробным и развернутым. Глава разделена на четыре параграфа, внутри которых выдержан хронологический порядок: "Психофизические эксперименты с людьми", "Регистрация вызванных электрических потенциалов в различных отделах слуховой системы", "Некоторые другие феноменологические исследования", "Гипотезы о возможных механизмах радиозвука". Обзор завершается сводкой основных феноменологических характеристик эффекта радиозвука и выводов о состоянии проблемы поиска его механизмов.

Глава 2. Физическое моделирование явления радиозвука. Отправной точкой выбора физической модели для исследования явления ра-

диозвука послужила работа Р.Э. Тиграняна (Тигранян Р.Э., 1984), в которой приводились результаты экспериментов по регистрации механических колебаний, возбужденных ИМ ЭМИ в поглощающих жидкостях. При этом столбик жидкости, заполнявший стеклянную пробирку, обладал свойствами четвертьволнового акустического резонатора, а интенсивность возбужденных колебаний была достаточной для восприятия их "на слух" с расстояния порядка одного метра. Простота и наглядность такой системы, а также ее эквивалентность по основным формальным признакам с теоретической моделью Дж. Лина (Lin J.C. 1978), позволили нам рассматривать ее как адекватную физическую модель для исследования эффекта радиозвука.

Аппаратура и методика.

В качестве модельных объектов использовали стеклянные пробирки с внутренним диаметром 7 мм и высотой 100 мм, заполненные жидкостью, как правило - этиловым спиртом. Высота столбика жидкости изменялась в пределах 30 - 80 мм. Облучение проводили в прямоугольном волноводе сечением 31 X 240 мм². В качестве источника ЭМИ применялся генератор с частотой несущей 800 МГц и максимальной импульсной мощностью 72 Вт. Частота следования импульсов изменялась в пределах 10 - 20000 Гц, длительность - 3 мкс - 10 мс. Регистрация механических колебаний, возбуждаемых в жидкости, осуществлялась с помощью системы на основе пьезокерамического датчика из титаната бария чувствительностью 10⁻⁶ В дин⁻¹ см².

Результаты.

Частота возбужденных механических колебаний близка к резонансной для данного столбика жидкости как четвертьволнового резонатора, т.е. $f_p = \frac{c}{4h}$, где c - скорость звука в данной жидкости, h - высота столбика жидкости. Амплитуда возбужденных механических колебаний максимальна при $f_u = f_p/n$, где f_u - частота следования импульсов, $n = 1, 2, \dots$, и тем больше, чем меньше n , а при $f_u = \frac{2n+1}{2} f_p$ наблюдались минимумы амплитуды. При перестройке f_u отчетливо фиксировались, как на экране осциллографа, так и "на слух", чередующиеся подъемы и спады интенсивности акустических колебаний в соответствующих точках частоты следования импульсов.

При изменении длительности импульсов - T_u , наблюдалась закономерность изменения амплитуды аналогичная теоретически получен-

ной Дж. Лином в упомянутой работе для сферической термоэластической модели с неопределенной добротностью в условиях действия одиночного импульса ЭМИ. Амплитуда изменялась от минимальной при $T_u = nT$ и до максимальной при $T_u = \frac{2n+1}{2} T$, где $n = 0, 1, 2, \dots$, а $T = 1/f_p$. Типичная осциллограмма механических колебаний, соответствующая последнему случаю, приведена на рисунке 1.

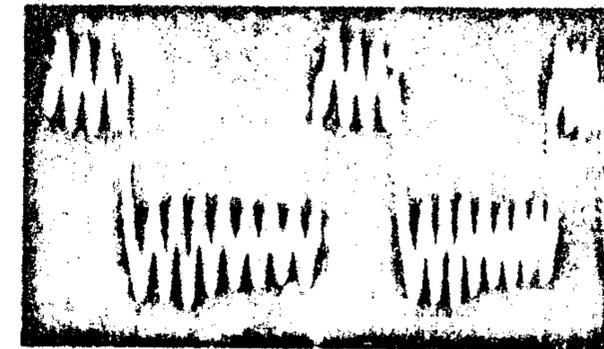


Рис. 1. Осциллограмма механических колебаний, возбуждающихся в пробирке с жидкостью.

На ней отчетливо просматривается огибающая поля в виде наведенного на пьезокристалл и протектированного на входных цепях усилителя сигнала импульсной последовательности. Благодаря наведенному сигналу видны колебания, возникающие как от переднего, так и от заднего фронтов импульса СВЧ. Видно также, что начальные фазы колебаний от переднего и от заднего фронтов имеют разные знаки, а сами колебания близки по амплитуде. Существенно, что в те моменты, когда происходит гашение резонансных колебаний при $T_u = nT$, отчетливо воспринимается "на слух" более низкий тон, соответствующий частоте следования импульсов.

Принципиальное отличие приведенных результатов от результатов, полученных Дж. Лином на своей модели, состоит в выявлении частотной зависимости амплитуды механических колебаний, что ставит нашу модель гораздо ближе к реальной ситуации с натурным эффектом радиозвука.

Особенно интересным и важным является результат, состоящий в возможности восприятия "на слух" низкочастотного тона, соответствующего частоте следования импульсов при $T_u = nT$, когда амплитуда резонансных колебаний в модели минимальна, а имеют место лишь пакки импульсов, заполненные колебаниями от переднего фронта. Этот результат позволяет рассматривать так называемый

низкочастотный тип радиозвука, обнаруженный в работе В.В. Тяжелова с сотр. (Tuzhchev V.V. et al., 1979) как воспринимаемую органом слуха первую гармонику механических колебаний, возбуждающихся внутри черепа, при одновременном подавлении более интенсивных резонансных колебаний, когда длительность импульса равна их периоду.

Таким образом, достаточно простая и наглядная система позволила объяснить ряд особенностей явления, полученных в работе В.В. Тяжелова с сотр., в том числе, зависимость порога радиозвука от длительности импульсов и природу "типов" радиозвука. Это дает право сам объект, на котором проводились исследования, рассматривать в качестве физической модели радиозвука.

Сферические модели.

На втором этапе исследования роли механических колебаний, возбуждаемых импульсами СВЧ, в формировании звуковых ощущений у лиц, подвергающихся облучению, нами были использованы жидкостные модели сферической формы как в большей степени отвечающие этой задаче.

Аппаратура и методика.

В экспериментах использовались стеклянные сферические колбы диаметром 105, 120 и 135 мм, оклеенные пористой резиной толщиной 10 мм и пластиковая сфера диаметром 120 мм, которые заполнялись этиловым спиртом. Облучение велось с помощью модифицированного генератора "Луч-58-1" с максимальной выходной импульсной мощностью 500 Вт на частоте несущей 2375 МГц. Модельные объекты облучались из открытого конца волновода сечением 10 X 72 мм² или из прямоугольного рупора сечением 90 X 72 мм. Возбужденные в жидкости механические колебания регистрировались на внешней поверхности сфер с помощью автономного пьезокерамического приемника или с помощью пьезокерамического датчика, вклеиваемого в отверстие в стенке колбы. Вся регистрирующая аппаратура находилась вне экранированного бокса, где размещалась облучательная аппаратура, модель и датчик механических колебаний.

Результаты.

Экспериментально показана линейная зависимость амплитуды механических колебаний, возбуждающихся в сферической модели от импульсной мощности ЭМИ. Это является аргументом в пользу термоэластической природы радиозвука, поскольку в натуральных экспери-

ментах наблюдается логарифмическая зависимость субъективной громкости или амплитуды вызванных потенциалов от импульсной мощности, а из физиологии слуха известно, что ухо - прибор логарифмический.

Прямые измерения показали, что в использованных сферических модельных объектах нет преимущественной концентрации электромагнитной энергии в их центре, как это можно было предполагать исходя из близости длины волны излучения (12,6 см) линейным размерам моделей.

Показано хорошее совпадение рассчитанных по формулам Л. Гарнея (Goutnau L., 1966) и полученных в наших экспериментах значений амплитуды давления акустических колебаний, возбуждающихся в модельных объектах импульсами ЭМИ.

При малой частоте следования импульсов (75 - 100 Гц) и длительности 10 мкс сняты спектры возбужденных механических колебаний в стеклянных сферах диаметром 105 и 120 мм и в пластиковой сфере диаметром 120 мм. На всех спектрах хорошо просматривается частота, соответствующая первой моде колебаний сферы со свободными границами $f_p = \frac{c}{2a}$, где c - скорость звука в жидкости, a - радиус сферы, а также другие частоты, которые по-видимому можно идентифицировать как моды колебаний f_{mn} , соответствующие сфере с закрепленными границами, где m - мода (тип) колебаний, n - номер обертона. Кроме того, в сферах с горлом отчетливо видна частота, соответствующая резонатору Гельмгольца $f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V}}$, где c - скорость звука в веществе, заполняющем резонатор, V - объем резонатора, l и S - высота и площадь горла резонатора, и частота, близкая по значению к частоте колебаний столбика жидкости как четвертьволнового резонатора $f_{1/4} = \frac{c}{4a}$.

В таблице I сведены все данные по возбуждающимся в сферах частотам и дана их предположительная идентификация, а также измеренная добротность механического резонанса Q для частоты, соответствующей $c/2a$. Из сравнения спектров возбужденных механических колебаний стеклянных колб, имеющих горло, со спектром колебаний, возбуждающихся в пластиковой сфере, не имеющей отверстий, можно сделать вывод о том, что частоты, лежащие ниже частоты $f_p = \frac{c}{2a}$, однозначно обусловлены наличием горла, то есть, они представляют собой частоты резонатора Гельмгольца и четвертьволнового резонатора и их обертоны. В этом смысле частота $f_p = \frac{c}{2a}$ является основной для наших моделей. Резонно полагать, что реаль-

Таблица I

| Тип сферической модели | Диаметр (мм) | Сфера со резонатором | | | | Сфера с закрашенной границей | | Добротность на частоте |
|--|--------------|----------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|--------------|------------------------|
| | | срезанная | с горлом | с резонатором | с резонатором | f_{z1} | f_{z2} | |
| | | $f = \frac{c}{2D}$ | $f = \frac{c}{2L\sqrt{1-\epsilon}}$ | $f = \frac{c}{2L}$ | $f = \frac{c}{2L}$ | f_{z1} | f_{z2} | $Q_p = \frac{c}{2v}$ |
| 1. Стеклопластиковая модель с срезанным до основания горлом, оклеенная и пристройкой резонаторной толщиной 10 мм | 105 | Эксп. | 11,6 | 1,95 | 2,58 | 16,8 | 7,07 7,85 | - |
| | | Расчет | 11,4 | 1,75 | 2,86 | 16,3 | 7,5 | 21,5 |
| 2. Стеклопластиковая модель с горлом высотой 30 мм, стеклянная пристройка резонаторной толщиной 10 мм | 120 | Эксп. | 10 | 1,15 | 2,53 | 13,9 | 6,3 | 16,85 17,4 |
| | | Расчет | 10 | 1,43 | 2,3 | 14,3 | 6,6 | 18,9 |
| 3. Пластиковая сфера с оболочкой толщиной 1 мм | 120 | Эксп. | 9,5 | - | - | 13,7 | - | 17,8 |
| | | Расчет | 10 | - | - | 14,3 | 6,3 | 18,9 |

Примечание. Все частоты даны в килогерцах.

ный прототип - голова - ближе всего к замкнутой модели с одинаковыми граничными условиями на всей поверхности. Исходя из этого, все зависимости, важные с точки зрения аналогии с радиовуком, снимались для основной частоты.

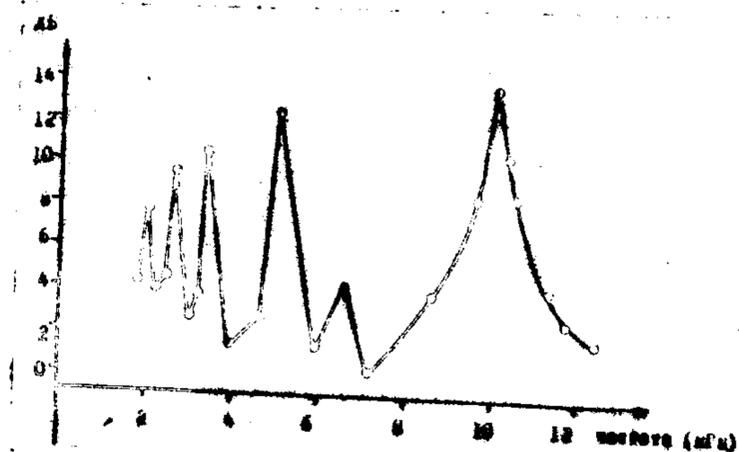


Рис. 2. Зависимость амплитуды основной частоты колебаний (10 кГц) в сфере диаметром 120 мм от частоты следования импульсов длительности 10 мкс.

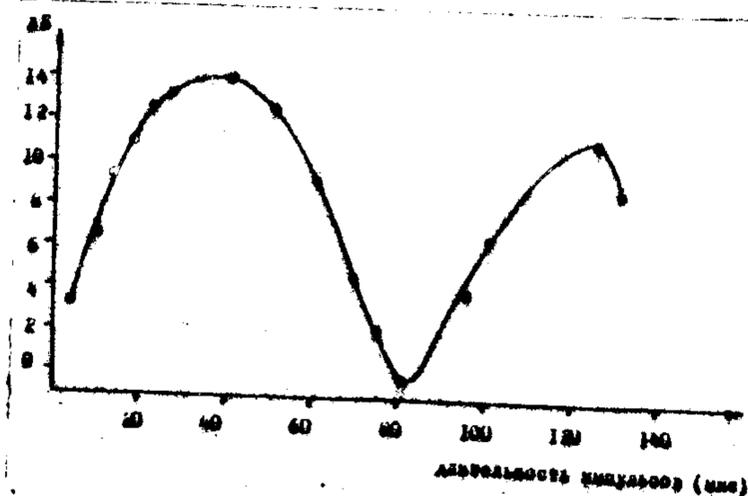


Рис. 3. Зависимость амплитуды основной частоты (11,8 кГц) механических колебаний в сферической колбе диаметром 105 мм от длительности импульсов при частоте следования 1,7 кГц.

На рисунке 2 приведена зависимость амплитуды основной частоты колебаний (10 кГц) в стеклянной сфере диаметром 120 мм от частоты следования импульсов длительности 10 мкс.

На рисунке 3 дана зависимость амплитуды основной частоты (11,8 кГц) колебаний в сферической колбе диаметром 105 мм от длительности импульсов при частоте их следования 1,7 кГц. Спектры колебаний, соответствующие максимуму и минимуму амплитуды основной частоты при длительностях 40 и 80 мкс приведены на рисунке 4.

Качественное подобие зависимостей, приведенных на рисунках 2 и 3, полученных на низкодобротных сферических моделях поро-

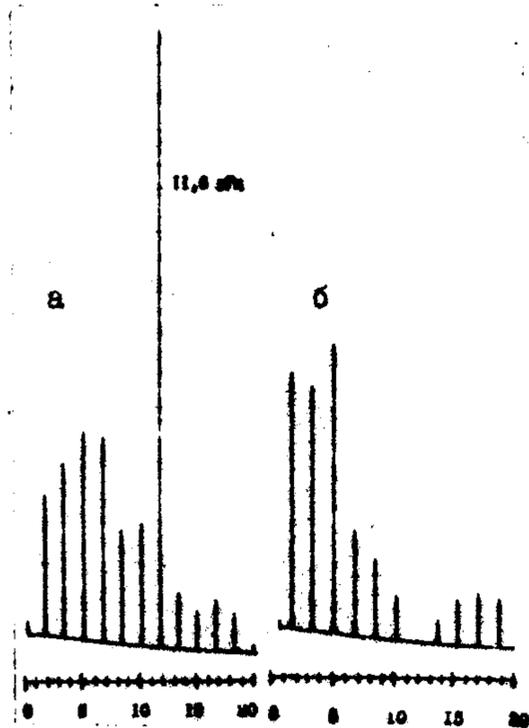


Рис. 4. Спектры механических колебаний в сфере диаметром 105 мм при частоте следования импульсов 1,7 кГц, соответствующие максимуму (длительность 40 мкс) - а и минимуму (длительность 80 мкс) - б амплитуды основной частоты на рисунке 3. Видно, что при длительности импульсов близкой к периоду колебаний основной частоты, компонента основной частоты оказывается подавленной, а преобладают низкочастотные, кратные частоте следования. Очевидно, что описанная в данном эксперименте ситуация, полностью соответствует возникающей в натурном эксперименте, при снятии пороговой кривой радиозвука в зависимости от длительности импульсов (Tyazhelov V.V. et al. 1979). Следовательно, ощущение внезапно появляющегося при длительности 110 - 120 мкс низкочастотного тона и исчезновение более интенсивного высокочастотного вызвано перераспределением спектральных компонент механических колебаний, возбуждающихся внутри головы и имеющих основную компоненту частоты 8 - 10 кГц.

вым кривым радиозвука, полученным в натуральных экспериментах, не вызывает сомнений, если преобразовать последние в кривые равной громкости.

Глава 3. Психоакустические исследования эффекта радиозвука.

Определение резонансных характеристик головы человека. Задача об определении резонансных характеристик головы человека вытекала из естественного предположения о том, что эти характеристики должны оказывать влияние на восприятие звуков по костному проведению, в том числе, и на восприятие радиозвука. С другой стороны, метод определения резонансных характеристик основывался на ожидании наличия некоторых особенностей в аудиограммах костного проведения на частоте (частотах) механического резонанса головы наблюдателя. Необходимость собственных исследований диктовалась отсутствием в литературе данных по аудиометрии слуховых порогов в диапазоне частот 4 - 12 кГц с малым шагом (не более 200 Гц).

Аппаратура и методика.

В качестве звукоизлучателя использовался акустический вибратор, представлявший собой батарею пьезокристаллов из сегнетовой соли, заключенную в дюралюминиевый стаканчик диаметром 30 мм и высотой 50 мм и залитую эпоксидной смолой. Излучатель накладывался плоским доньшком на лоб испытуемого и фиксировался в таком положении в течение всей процедуры. Порог определялся в 41 точке в диапазоне 4 - 12 кГц с шагом 200 Гц. В экспериментах участвовало 6 мужчин в возрасте от 22 до 35 лет. Аудиограммы строились по 3 - 5 испытаниям после предварительного усреднения в каждой точке и с учетом характеристики костного телефона.

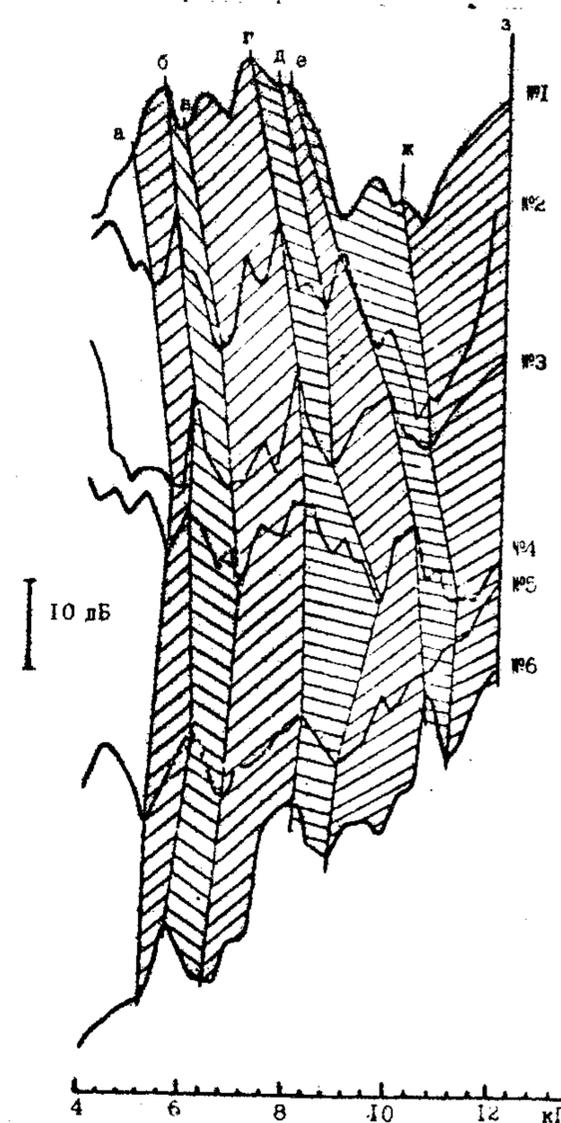


Рис. 5. Аудиограммы слуховых порогов по костному проведению. Чередующиеся зоны подъемов и спадов чувствительности выделены наклонной штриховкой, а линии, соединяющие соответствующие особенности, обозначены строчными буквами. Хорошо видно, что каждая аудиограмма сугубо индивидуальна и, следовательно, нельзя без ущерба для информативности строить общую аудиограмму для "усредненного" испытуемого. С другой стороны, все аудиограммы имеют безусловное сходство типа подобия формы. Сходство это состоит в наличии чередующихся подъемов и спадов чувствительности, а различие - в положении экстремумов на оси частот и их относительной величине. Вид пороговых кривых может быть интерпретирован как результат их формирования под влиянием резонансных свойств костей черепа и головы как целого. Подъем порога, отмечающийся на всех аудиограммах в зоне "в" - "д" с максимумом по линии "г", в районе 7 - 8,5 кГц и существенное снижение порога в зоне "е" - "ж" на частотах 10 - 11 кГц хорошо коррелирует с аналогичными особенностями на пороговых кривых радиозвука из упоминавшейся работы В.В. Тяжелова с соотр.

Результаты. На рисунке 5 приведены все 6 аудиограмм, под номерами, соответствующими тем, которые присваивались испытуемым. Основной вывод, который можно сделать из экспериментов по ау-

диометрии слуховых порогов по костному проведению, состоит в том, что голова человека может рассматриваться как многомодовый резонатор, что проявляется в характере аудиограмм снятых с использованием малого (200 Гц) шага по частоте. При этом, особенности в восприятии звуков по костному проведению оказывают влияние и на характер восприятия радиозвука.

Моделирование радиозвука с помощью акустических сигналов.

Аппаратура и методика. На костный телефон, располагавшийся так же, как и в аудиометрических экспериментах, подавался сигнал, представлявший собой серии затухающих колебаний частоты, близкой к 8 кГц. Частота повторения серий изменялась посредством изменения частоты следования запускающих импульсов.

Результаты. Звук, воспринимаемый с костного телефона, по основным своим характеристикам оказался сходным с радиозвуком. Это касается зависимостей интенсивности и тембральной окраски субъективно воспринимаемого звука, как от частоты следования импульсов, так и от их длительности. Кроме того, при одновременном прослушивании сигналов от костного телефона и через слуховые каналы от обычных телефонов, на которые подавался тональный сигнал, были отмечены нулевые биения, как и в натурном эксперименте с радиозвуком, описанном в работе (Tyazhelov V., et al, 1979), за исключением наличия биений на частотах ниже 8 кГц в наших экспериментах, при отсутствии их в указанной работе В.В. Тяжелова с соотр.

Глава 4. Двухконтурная модель механизма формирования радиозвука.

Несмотря на то, что на низкодобротной сферической модели были получены результаты, хорошо согласующиеся с данными натурных экспериментов по радиозвуку и объясняющие ряд его существенных свойств, детальный анализ модельных экспериментов показал, что остаются некоторые особенности явления, воспроизвести и полностью объяснить которые с помощью резонансной сферической модели не удается. В частности, трудно объяснить подъем порога на аудиограммах в той же частотной области, что и на пороговых кривых радиозвука или крутизну подъема - до 90 дБ/окт - при очень низкой добротности резонатора. Исключить эти и другие противоречия оказывается возможным, если признать не только формальное сходство пороговых кривых радиозвука и аудиограмм слуховых порогов по костному

проведению, но и предположить, что те и другие характеризуют резонансные свойства воспринимающей их механической системы и представляют собой ее амплитудно-частотную характеристику (АЧХ).

Из теории четырехполосников известно, что двугорбую АЧХ можно реализовать с помощью двух колебательных контуров со степенью связи (K) выше критической ($K_{кр}$). В качестве первого контура нами было предложено рассматривать модель Дж. Лина (Lin J.C., 1978), скорректированную с учетом результатов, полученных во второй главе. На роль второго контура могут претендовать несколько анатомических структур головы, однако условиям сильной связи и настройки на частоту колебаний первого резонатора лучше всего отвечает гидродинамическая система улитки органа слуха, поскольку всегда имеет место максимум отклонения базилярной мембраны в точке локализации омежения, строго соответствующей внешней возбуждающей частоте. Кроме того, оценки, сделанные по некоторым известным из литературы параметрам обоих резонаторов, дают основание полагать выполненным условие $K > K_{кр}$ в такой системе. Думается, что рассмотрение лобных пазух, например, или каких-либо иных анатомических образований в голове человека в качестве второго резонатора, с отведением улитке органа слуха роли приемника суммарного сигнала, не изменит сути дела, поскольку улитка является последним звеном, участвующим в формировании АЧХ механической системы.

Рассмотренная концепция была положена в основу электронной модели, в которой в качестве первичной частотно-избирательной системы взяты два связанных параллельных контура, настроенных на частоту 7,4 кГц, с внешней емкостной связью и добротностями, равными оценочным значениям для резонаторов-прототипов. Принципиальная схема модели разработана Р.Э. Тиграняном, конструкция и подбор параметров выполнены А.Л. Гороховым. Возбуждение модели производилось прямоугольными импульсами через интегрирующие цепочки, позволявшие имитировать форму фронтов тепловых импульсов. Кроме того, в модели имелась возможность имитировать наличие различных высокочастотных границ слуха (ВЧГС) у испытуемых, а также моделировать нулевые биения между возбужденными колебаниями и тональным сигналом, для чего последний подводился через специальный вход, частотные характеристики которого были близки к таковым для системы слуховой канал - среднее ухо. Выходной сигнал электронной модели можно было наблюдать на экране осциллографа и воспринимать

"на слух" при помощи усилителя мощности и электродинамического излучателя.

Результаты модельных экспериментов.

При частоте следования импульсов до резонансной (7,4 кГц) спектр выходного сигнала модели имеет поличастотный характер, в области частот выше 7,4 кГц - сигнал монотонный и точно равен по частоте f_u . Это хорошо согласуется с результатами натурных экспериментов по радиозвуку.

Сравнение спектров выходного сигнала модели для длительностей импульсов 15 и 100 мкс при частоте следования 2 кГц подтверждает наш вывод о том, что так называемые "типы" радиозвука - суть разные формы его проявления, зависящие от спектрального состава возбуждающихся механических колебания.

На рисунке 6 приводятся АЧХ модели, полученные в режиме ударного возбуждения импульсами длительности 15 мкс при имитации двух разных ВЧГС. Для демонстрации аналогии с результатами натурных экспериментов, на них наложены кривые равной громкости, полученные из соответствующих пороговых кривых радиозвука.

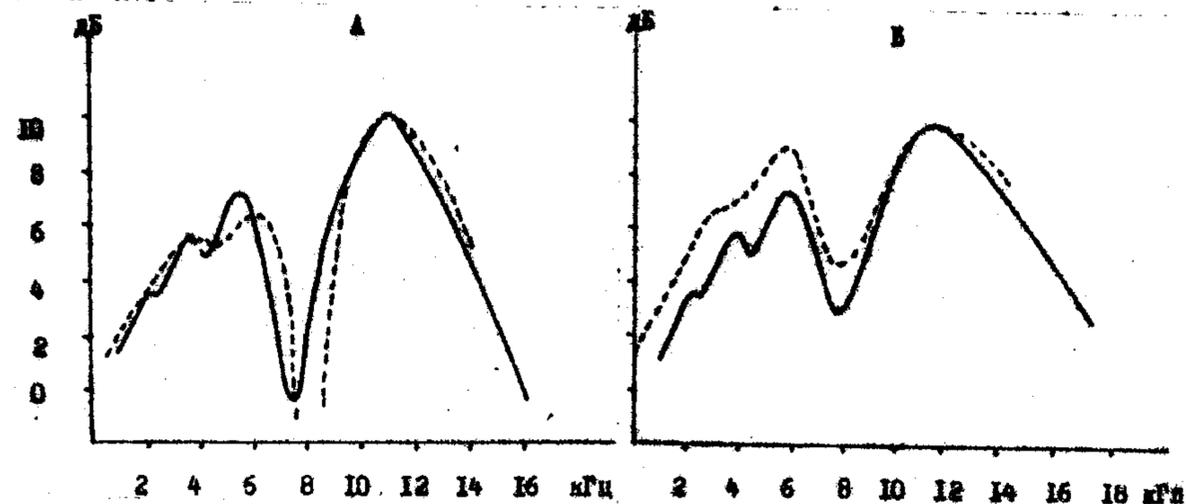


Рис. 6. АЧХ модели в режиме ударного возбуждения при имитации ВЧГС: А - 14 кГц, Б - 17 кГц. Пунктиром показаны кривые равной громкости, полученные из соответствующих пороговых кривых радиозвука.

При одновременной подаче на модель импульсной последовательности и гармонического сигнала, были обнаружены, так же, как и в натурном эксперименте, нулевые биения, однако они имели место не только при частоте тонального сигнала выше 8 кГц, но и в области

частот ниже резонансной.

Глава 5. Натурный эксперимент.

Поскольку из результатов модельных экспериментов следовало, что нулевые биения должны существовать не только на частотах выше 8 кГц, но и в области, лежащей ниже, нами была предпринята попытка проверить это предположение собственным натурным экспериментом.

Аппаратура и методика.

В натурном эксперименте использовался генератор с частотой несущей 800 МГц и максимальной выходной импульсной мощностью 120 Вт. Облучение производилось из открытого конца прямоугольного волновода сечением 150 X 270 мм². Облучалась темная часть головы с расстояния, не превышавшего 50 мм. Уровень окружающего шума составлял 20 - 25 дБ относительно абсолютного порога слуха. Тональный акустический сигнал подавался через головные телефоны, находившиеся либо на голове, либо, с целью вынесения их из зоны облучения, перед испытуемым на расстоянии вытянутой руки. В экспериментах участвовали 3 испытуемых.

Результаты.

Нулевые биения были зафиксированы всеми испытуемыми. Частоты, на которых регистрировались биения, приводятся в таблице 2.

Таблица 2.

| Испытуемый | Частоты (кГц) |
|------------|------------------------|
| И 1 | 3,58; 4,21; 5,23; 6,99 |
| И 2 | 4,01; 5,73; 6,99 |
| И 3 | 3,80; 4,74; 4,97 |

При этом, разница между частотой следования импульсов генератора ЭМИ и частотой подбираемого тонального сигнала с звуком генератора, не превышала 20 Гц.

Выводы.

1. Обоснована возможность применения цилиндрических и сферических объемов, заполненных поглощающей жидкостью, в качестве моделей для исследования эффекта радиозвука.

2. Показана единая природа высокочастотного и низкочастотного "типов" радиозвука. В модельных экспериментах воспроизведены их аналоги, доступные визуальному наблюдению на экране осцил-

лографа и непосредственному восприятию "на слух". Методом спектрального анализа механических колебаний, возбуждающихся в сферических объемах, определены условия, при которых проявляется тот или другой "тип" радиозвука.

3. Экспериментально показано, что в жидкостных сферических моделях с низкой добротностью основной частотой возбужденных механических колебаний является частота, близкая по значению к первой моде колебаний сферического объема со свободной поверхностью.

4. Методом аудиометрии слуховых порогов по костному проведению с шагом 200 Гц получены аудиограммы с большим разрешением по частоте по сравнению с традиционными методами, использующими октавный шаг.

5. Показано, что аудиограммы слуховых порогов по костному проведению формируются под влиянием резонансных свойств анатомических структур головы, которая может быть представлена в виде сложной системы акустических резонаторов.

6. Показано, что радиозвук может быть промоделирован акустическим сигналом специальной формы, подводимым по кости.

7. Показано, что существенные особенности эффекта радиозвука и результаты аудиометрии слуховых порогов по костному проведению могут быть объяснены с помощью концепции, предполагающей существование по крайней мере двух акустических резонаторов с сильной связью.

8. Показано, что АЧХ электронного аналога двухконтурной резонансной модели радиозвука в режиме ударного возбуждения воспроизводят форму пороговых кривых радиозвука, полученных в натурном эксперименте.

9. В натурном эксперименте зарегистрированы нулевые биения радиозвука с тональным акустическим сигналом для частот, лежащих ниже 8 кГц, что изменяет представления о возможности существования биений (и самого радиозвука) только в области частот выше 8 кГц.

10. Показана физическая природа явления радиозвука, состоящая в поглощении энергии ЭМИ и преобразовании ее в механическую в тканях головы, обладающей свойствами акустического резонатора, и передаче механических колебаний к улитке органа слуха посредством костной проводимости.

Список статей, опубликованных по теме диссертации.

1. Тигранян Р.Э., Шорохов В.В. К вопросу о физическом моделировании акустических эффектов при действии СВЧ-полей на биологические системы // Биофизика. 1985. Т. 30. Вып. 5, 6. 694 - 699.
2. Шорохов В.В., Тигранян Р.Э., Машин П.В. Исследование особенностей эффекта радиозвука с помощью сферической модели // Биофизика. 1986. Т. 31. Вып. 4. С. 695 - 700.
3. Тигранян Р.Э., Шорохов В.В. Физические основы слухового эффекта СВЧ. - В об.: Биологические эффекты электромагнитных полей. Вопросы их использования и перекривания. Пути: ОНТИ ИЦЕМ. 1986. С. 68 - 75.
4. Тигранян Р.Э., Шорохов В.В. Частотный диапазон слухового эффекта СВЧ // Биофизика. 1988. Т. 33. Вып. 2. С. 349 - 350.
5. Тигранян Р.Э., Шорохов В.В., Горюхов А.Л. Двухконтурная резонансная модель слухового эффекта импульсных полей СВЧ. ВИНТИ. 1988. Деп. № 2506-В88. Аннот.: Биофизика. 1988. Т. 33. Вып. 3. С. 536.
6. Шорохов В.В., Тигранян Р.Э. Слуховые эффекты импульсных электромагнитных полей СВЧ. Аналитический обзор. ВИНТИ. 1988. Деп. № 7777-В88. Аннот.: Биофизика. 1989. Т. 34. Вып. 1.

МФТИ Т-19148 21.11.88 Зак. 1/448 тир. 100