радиусом корреляции отраженных сигналов по низкочастотной составляющей, что подтверждает высказанное ранее предположение о возникновении ее как результата изменения озвученной области дна при движении судна [1, 2]. Геометрический расчет показывает, что в приведенном случае смещение судна на расстояние, равное радиусу корреляции по низкой частоте, соответствует «обновлению» отражающей области дна на ~25%.

Таким образом, данные корреляционного анализа подтверждают существование разных масштабов горизонтальной корреляции амплитуды отраженных от дна сигналов и не противоречат приблизительным оценкам и предположениям, сделанным ранее.

Отметим в заключение, что при нулевом временном сдвиге значения коэффициента корреляции для выделенных слагаемых близки друг другу. Это означает, что мощность высокочастотной и низкочастотной составляющих в исходном процессе примерно одинаковы и пренебрегать какой-либо из них в общем случае нельзя. Отсюда, в частности, следует, что при реализации предложенного недавно акустического способа определения скорости судна относительно дна [3] в дрейфе целесообразно производить фильтрацию процесса по низкой частоте, поскольку, как легко показать, точность его по низкой частоте значительно меньше, чем по высокой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воловов В. И., Лысанов Ю. П., Сечкин В. А.* О пространственной корреляции звуковых сигналов, отраженных от дна океана. Акуст. ж., 1973, *19*, 1, 16—20.
2. *Воловов В. И., Житковский Ю. Ю.* Отражение и рассеяние звука дном океана. В кн. Акустика океана. М., «Наука», 1974, 395—490.
3. *Воловов В. И., Краснобородько В. В., Лысанов Ю. П., Сечкин В. А.* Новый акустический способ определения скорости судна. Океанология, 1977, *17*, 1, 158—163.
4. *Лысанов Ю. П., Воловов В. И.* Исследование флуктуаций звуковых сигналов при рассеянии их на дне океана. Морское приборостроение. Сер. Акустика, 1972, 2, 25—42.

Акустический институт
Академии наук СССР

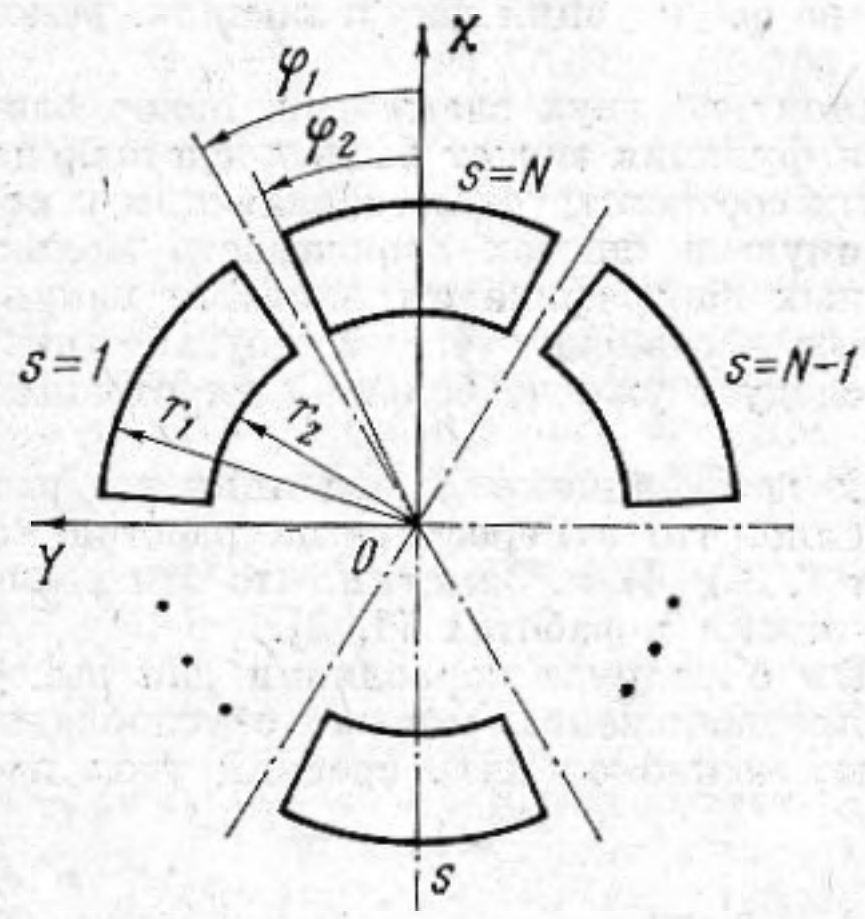
Поступила
28 марта 1978 г.

УДК 534.26

ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ БЕСКОНЕЧНОЙ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ С ЗАЗОРАМИ

А. Г. Лейко

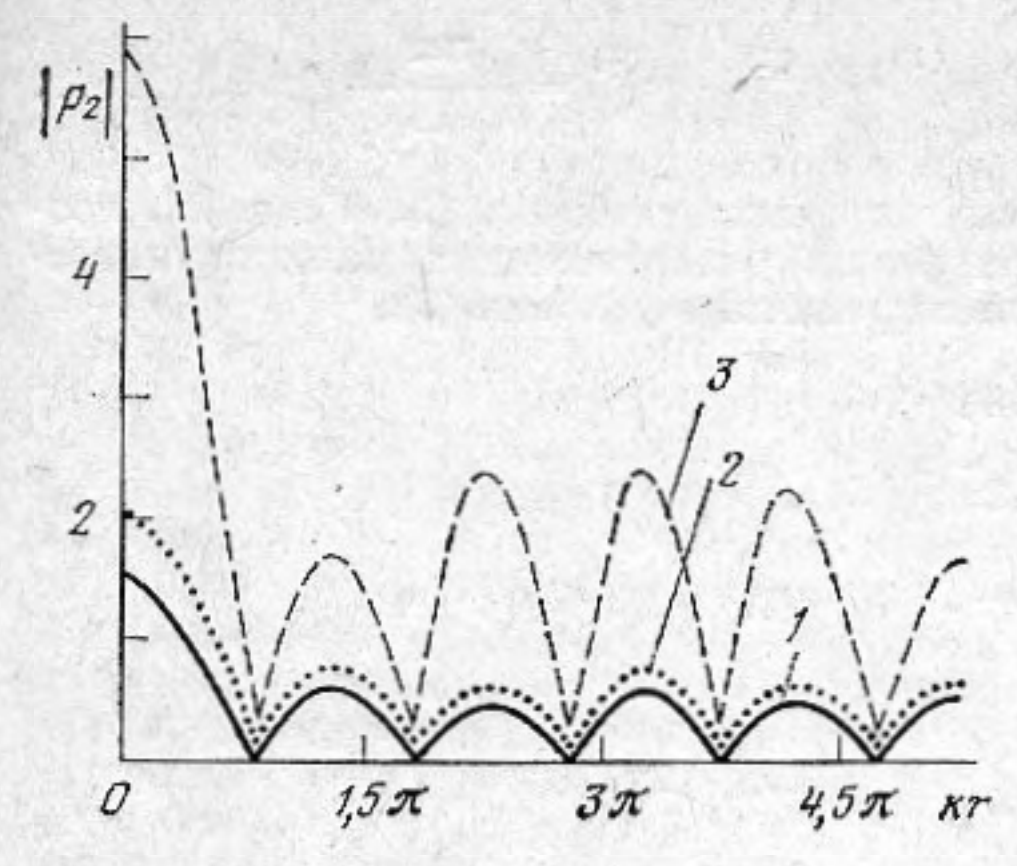
Определим звуковое поле, создаваемое в безграничной однородной изотропной среде бесконечной круговой цилиндрической периодической решеткой (фиг. 1), при наличии зазоров между излучающими элементами. Число элементов в решетке произвольно и равно N, а диаметры ее внешней и внутренней излучающих поверхностей составляют соответственно $2r_1$ и $2r_2$. Каждый элемент решетки представляет собой тело, образованное пересечением поверхностей решетки и полуплоскостей, исходящих из ее продольной оси. Будем полагать, что возбуждаемые синфазно элементы решетки совершают радиальные колебания со скоростями v_1 и v_2 на внешней и внутренней поверхностях элементов, а колебания боковых граней элементов отсутствуют.



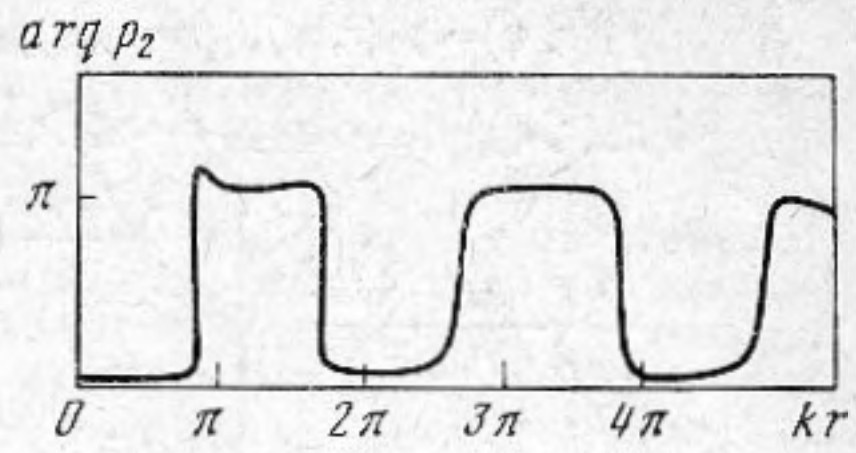
Фиг. 1. Нормальное сечение круговой цилиндрической решетки

Рассматриваемая задача сводится к построению решения двумерного волнового уравнения Гельмгольца относительно звукового давления p, удовлетворяющего на поверхностях элементов заданным граничным условиям. Решение задачи осуществим методом частичных областей в круговых цилиндрических координатах.

Разделим область существования определяемого звукового поля на ряд подобластей. Прежде всего, исходя из периодичности круговой цилиндрической решетки, а следовательно, и создаваемого ею звукового поля с периодом $2\varphi_1=2\pi/N$, выделим пространственный сектор углов, ограничив его абсолютно жесткими полуплоскостями $\varphi=\pm\varphi_1$. Далее в этом пространственном секторе с помощью цилиндрических поверхностей радиусов r_1 и r_2 выделим три области, определив их границы неравенствами $r_1\leqslant r\leqslant\infty$, $0\leqslant r\leqslant r_2$ и $r_2\leqslant r\leqslant r_1$ для первой, второй и третьей областей соответственно.



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Распределение амплитуды звукового поля вдоль радиуса для внутренней области решетки, состоящей из четырех элементов, определяемых углами $\varphi_2=25°$ (*1*); 16° (*2*); 12° (*3*), для направлений $\varphi=\varphi_2$

Фиг. 3. Распределение фазы звукового поля вдоль радиуса для внутренней области решетки, состоящей из четырех элементов, определяемых углом $\varphi_2=25°$, для направления $\varphi=\varphi_2$

С учетом обозначений, указанных на фиг. 1, и принятого разделения областей граничные условия задачи могут быть сформулированы следующим образом:

$$\frac{1}{i\omega\rho}\frac{\partial p}{\partial r}=0, \qquad 0\leqslant r<\infty, \qquad \varphi=\pm\varphi_1; \tag{1}$$

$$\frac{1}{i\omega\rho}\frac{\partial p}{\partial r}=0, \qquad r_2\leqslant r\leqslant r_1, \qquad \varphi=\pm\varphi_2; \tag{2}$$

$$\frac{1}{i\omega\rho}\frac{\partial p}{\partial r}=v_j(\varphi), \qquad r=r_j, \qquad -\varphi_2\leqslant\varphi\leqslant\varphi_2, \qquad j=1,2, \tag{3}$$

где i – мнимая единица, ρ – плотность среды, окружающей элементы, ω – круговая частота.

Представим звуковые поля в каждой из областей в виде разложений по собственным волновым функциям этих областей:

$$p_1(r,\varphi)=\sum_{q=0}^{\infty}A_q H^{(1)}_{m_q^{(1)}}(kr)\cos m_q^{(1)}\varphi, \tag{4}$$

$$p_2(r,\varphi)=\sum_{\vartheta=0}^{\infty}B_\vartheta J_{m_\vartheta^{(2)}}(kr)\cos m_\vartheta^{(2)}\varphi, \tag{5}$$

$$p_3(r,\varphi)=\sum_{n=0}^{\infty}\left[V_n J_{m_n^{(3)}}(kr)+W_n N_{m_n^{(3)}}(kr)\right]\cos m_n^{(3)}(\varphi-\varphi_2), \tag{6}$$

где A_q, B_ϑ, V_n и W_n – комплексные коэффициенты, $H^{(1)}_{m_q^{(1)}}(kr)$, $J_{m_\vartheta^{(2)}}(kr)$, $N_{m_n^{(3)}}(kr)$ – функции Ханкеля первого рода, Бесселя и Неймана, k – волновое число. Решение для первой области удовлетворяет условию Зоммерфельда. Решение для второй области выбрано с учетом того, что во всех ее точках звуковое давление должно иметь ограниченную величину. Решения во всех трех областях представлены с учетом симметричности поля относительно оси OX (фиг. 1).

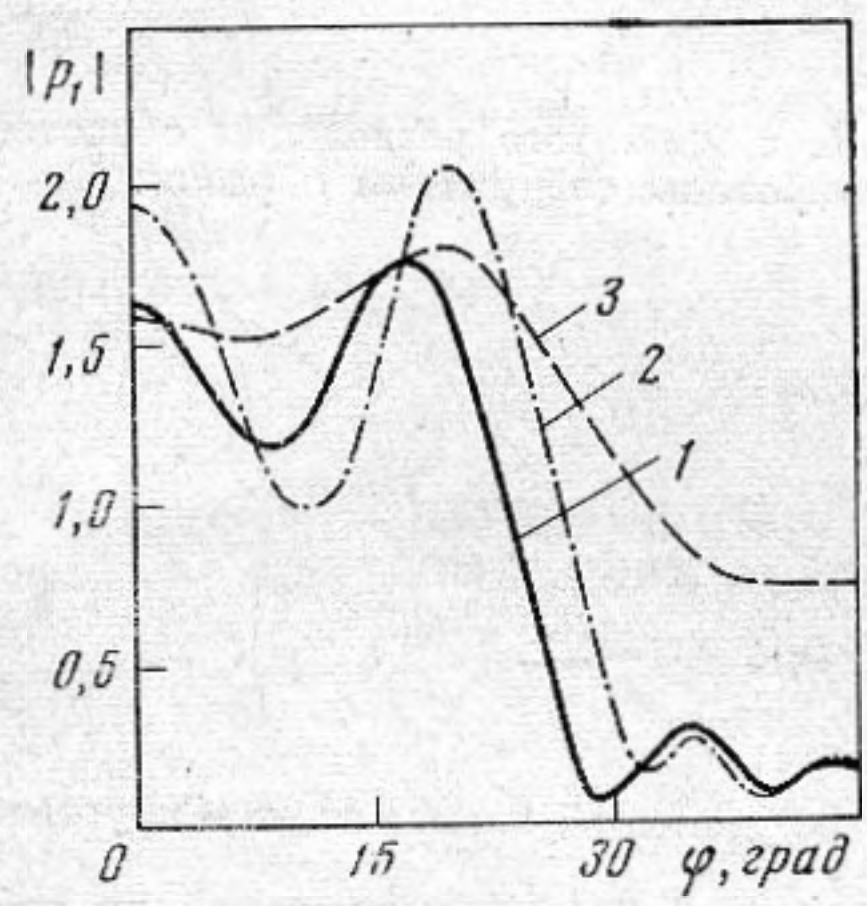
Постоянные разделения $m_q^{(1)}$, $m_\vartheta^{(2)}$ и $m_n^{(3)}$ определяются из граничных условий

(1) и (2) и равны $m_q^{(1)} = \frac{\pi q}{\varphi_1}$, $q=0, 1, 2, \ldots$; $m_q^{(1)} = m_\vartheta^{(2)}$, $m_n^{(3)} = \frac{\pi n}{\varphi_1 - \varphi_2}$, $n=0, 1\ 2, \ldots$

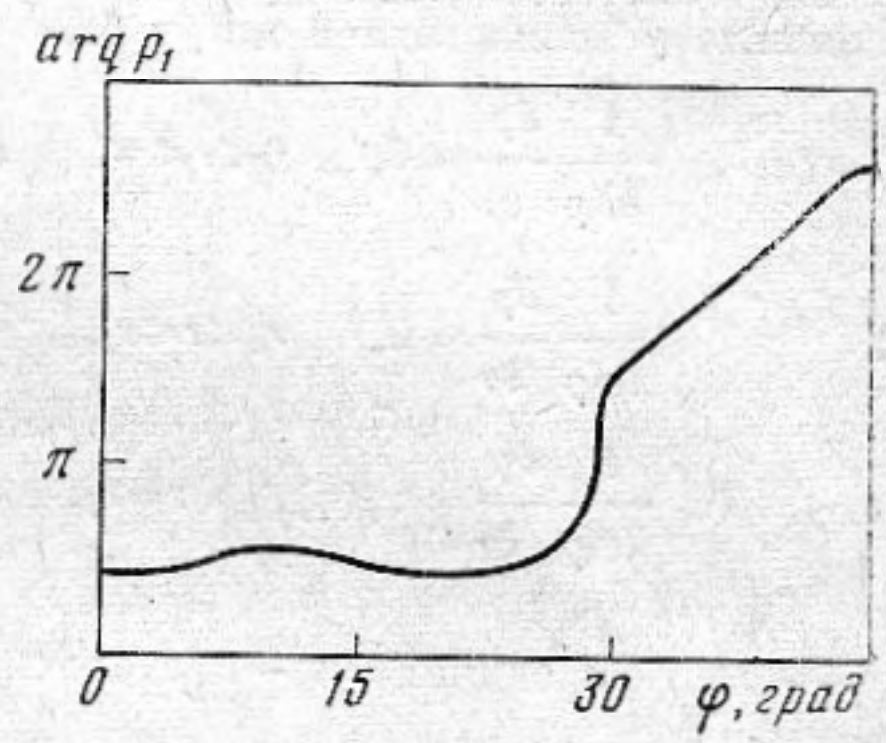
Для отыскания неизвестных коэффициентов разложений A_q, B_ϑ, V_n и W_n воспользуемся системой функциональных уравнений, объединяющих условия непрерывности поля на границах раздела областей и граничные условия (3):

$$
(7)\qquad
\begin{aligned}
&p_1(r, \varphi) = p_3(r, \varphi), \quad r=r_1, \quad \varphi_2 \leqslant |\varphi| \leqslant \varphi_1;\\
&p_2(r, \varphi) = p_3(r, \varphi), \quad r=r_2, \quad \varphi_2 \leqslant |\varphi| \leqslant \varphi_1;\\
&\frac{1}{i\omega\rho}\frac{\partial p_j(r, \varphi)}{\partial r} = \begin{cases} \dfrac{1}{i\omega\rho}\dfrac{\partial p_3(r, \varphi)}{\partial r}, & r=r_j, \quad \varphi_2 \leqslant |\varphi| \leqslant \varphi_1;\\[2ex] v_j(\varphi), & r=r_j, \quad 0 \leqslant |\varphi| \leqslant \varphi_2, \quad j=1, 2. \end{cases}
\end{aligned}
$$

Алгебраизация этой системы путем подстановки в соотношения (7) выражений (4)–(6) и использования свойств полноты и ортогональности систем функций $\cos m_q^{(1)}\varphi$, $\cos m_\vartheta^{(2)}\varphi$ и $\cos m_n^{(3)}(\varphi-\varphi_2)$ на интервалах $0 \leqslant |\varphi| \leqslant \varphi_1$, $0 \leqslant |\varphi| \leqslant \varphi_1$ и $\varphi_2 \leqslant |\varphi| \leqslant \varphi_1$ соответственно приводит к бесконечной системе линейных неоднородных алгебраических уравнений относительно неизвестных A_q, B_ϑ, V_n и W_n.



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Угловое распределение амплитуды звукового поля на внешней поверхности решетки, состоящей из четырех элементов, определяемых углами $\varphi_2=25°$ (*1*); 16° (*2*); 12° (*3*)

Фиг. 5. Угловое распределение фазы звукового поля на внешней поверхности решетки, состоящей из четырех элементов, определяемых углом $\varphi_2=25°$

Бесконечная система уравнений относится к квазирегулярным системам и разрешима методом усечения. Доказательство соответствия ее матричных элементов и правых частей требованиям, предъявляемым к таким системам, осуществляется аналогично тому, как это сделано в работе [1].

В качестве примера применения полученных соотношений произведем количественную оценку распределения звукового поля. Для численных расчетов мы ограничились решеткой из четырех элементов, волновые размеры диаметров внешней и внутренней поверхностей которой равны соответственно $2kr_1=6\pi$ и $2kr_2=5{,}5\pi$. Вычисления звукового поля производились в предположении, что излучают только внешние поверхности элементов ($v_1=1$), а внутренние поверхности заторможены ($v_2=0$). Результаты расчетов распределения амплитуды (p) и фазы $\arg p$ звукового поля решетки вдоль радиуса внутренней области ее и на внешней поверхности решетки представлены на фиг. 2–5.

Анализ приведенных результатов свидетельствует о существенном влиянии зазоров между элементами решетки на формируемое решеткой звуковое поле. Из физических соображений ясно, что если бы решетка не имела зазоров между элементами, то звуковое поле во внутренней ее области отсутствовало бы, а во внешней — характеризовалось бы равномерным распределением амплитуды и фазы. Наличие

зазоров между элементами решетки сопровождается образованием звукового поля внутри решетки и нарушением равномерности поля вне решетки.

Звуковое поле внутри решетки (фиг. 2 и 3) характеризуется наличием осцилляций, величина которых зависит от волновых размеров решетки и угловых размеров зазоров. При этом значительное увеличение давления имеет место вблизи продольной оси решетки, поскольку звуковые волны, излучаемые всеми зазорами, приходят к оси решетки в одной и той же фазе. Уменьшение угловых размеров зазоров приводит к увеличению амплитуд осцилляций.

Характер распределения давления вдоль радиуса внутренней области решетки не зависит от угловых размеров зазоров и определяется волновыми размерами решетки.

Звуковое поле вне решетки при наличии зазоров приобретает сложный вид. Его амплитуда (фиг. 4) и фаза (фиг. 5) не только осциллируют вдоль внешней поверхности решетки, но и резко отличаются по величине для тех участков поверхности, которые соответствуют элементам и зазорам. Эти особенности поля характерны для больших угловых размеров зазоров. При уменьшении последних, начиная с некоторой величины, осцилляции в угловом распределении поля сглаживаются, а неравномерность распределений амплитуды и фазы поля на поверхности элементов и в зазорах уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вовк И. В., Гринченко В. Т., Маяцкий В. И.* Звуковое поле бесконечного кругового цилиндрического преобразователя, частично покрытого слоем акустически мягкого материала. Акуст ж., 1972, *18*, 3, 365–369.

Поступила
11 января 1978 г.

УДК 616.28.14

ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗЛИЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКОМ ФРОНТА НАРАСТАНИЯ ЗВУКОВЫХ СТИМУЛОВ

Б. М. Сагалович, В. Н. Цуканова

Наряду со стационарными признаками звукового стимула отологически нормальные слушатели способны различать переходные его процессы. Это относится, в частности, к включению и выключению звукового сигнала. Такие признаки сигнала могут играть весьма важную роль в его опознании. В ряде случаев они представляются более существенными, чем стационарные признаки сигнала. Одним из главных переходных признаков звукового сигнала является изменение его фронта нарастания. Лица с нормальным слухом способны дифференцировать эти изменения по различным критериям [1, 2]. Как следует из данных электрофизиологической регистрации вызванных потенциалов слуховой зоны коры головного мозга, изменения фронта нарастания звуковых стимулов отражаются в слуховом ответе более выраженно, чем изменения длительности звукового стимула. Эти факты получены как при экспериментах на животных, так и в исследованиях на людях [3–5].

Ниже представлены результаты изучения способности дифференцирования тонов по крутизне фронта их нарастания у отологически нормальных лиц различных возрастных групп. Обследованию подверглись 80 человек, составивших 7 возрастных групп. В первую группу из 20 человек были включены лица в возрасте 18–20 лет и эта группа была принята за базовую. Остальные 6 групп включали в себя по 10 человек в возрасте соответственно 21–30, 31–40, 41–50, 51–60, 61–70 и 71–80 лет. Все испытуемые предварительно подвергались тональной аудиометрии и тщательной отоскопии. При наличии каких-либо отклонений от нормы обследованные лица исключались из основных испытаний.

Звуковые стимулы формировались с помощью задающего генератора прямоугольных импульсов, генератора нарастающего и падающего напряжения, формировавшего трапециевидные импульсы, модулятора, усилителя низкой частоты с аттенюатором и электродинамического телефона. Составленное из этих компонентов устройство позволяло строго дозировать и произвольно изменять фронт нарастания и спада звуковых стимулов в пределах от 0 до 100 *мс*. Стимулы заполнялись частотами 500, 1000 и 4000 *Гц*. Постоянная длительность стимула во всех случаях составляла 100 *мс*, а интенсивность – 40 *дБ* над порогом слышимости. На фигуре представлены осциллограммы звуковых стимулов, использовавшихся при опытах.

Испытуемым предъявлялись для различения спаренные сигналы таким образом, чтобы получить ответ об идентичности или различии сигналов, составляющих пару. Критерием различения сигналов в паре служили громкость и плавность нарастания.