

УДК 536.24:622.233

Г.И. Сокол, О.С. Омелюшко

*Днепровский национальный университет имени О.Гончара*

## **ВЕКТОРНО-ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОЧАСТОТНОГО АКУСТИЧЕСКАЯ ПОЛЯ В ПОЛОСТИ РУПОРА**

**Проведён анализ векторно-фазовых характеристик низкочастотного акустического поля в полости рупора. Экспериментально получена амплитудно-частотная характеристика безразмерной активной составляющей импеданса.**

*Ключевые слова: низкочастотный, векторно-фазовые характеристики, рупор.*

**Проведено аналіз векторно-фазових характеристик низькочастотного акустичного поля в порожнині рупора. Експериментально отримана амплітудно-частотна характеристика безрозмірної активної складової імпедансу.**

*Ключові слова: низькочастотний, векторно-фазові характеристики, рупор.*

**The analysis of vector-phase characteristics of a low-frequency acoustic field in the cavity of the horn is carried out. The amplitude-frequency characteristic of the dimensionless active component of the impedance is experimentally obtained.**

*Key words: low-frequency, vector-phase characteristics, horn.*

### **Актуальность темы.**

Метод векторно-фазовых характеристик [1-4] был ранее применён для исследования пространственного распределения основных характеристик звуковых и инфразвуковых полей. Однако структура акустического поля на низких частотах в полостях рупорах до сих пор не изучалась. Постановка и решение данной проблемы определяет актуальность выбранной темы исследований.

Целью данной работы является анализ векторно-фазовых характеристик низкочастотного акустического поля в полости рупора.

### Общая часть.

#### 1. Аналитический обзор

В известных работах по исследованию излучения волн звукогенераторами с рупорами инфразвуковой диапазон частот ранее не рассматривался.

Определяющим моментом в развитии теории излучения волн рупорами являлась публикация работы А.Г.Вебстера [5] в которой приведено волновое уравнение в виде

$$\varphi = c^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + c^2 \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\lg S),$$

где  $\varphi$  – потенциал,  $c$  – скорость звука,  $x$  – текущая координата вдоль оси рупора,  $S$  – площадь сечения.

В [6] введено понятие акустического сопротивления. В работе [7] приведено описание распространения волн в коническом и экспоненциальном рупорах бесконечной и конечной длин. Длину рупора предлагается выбрать такой большой, как только возможно на практике. В случае экспоненциального рупора получено решение для расходящейся волны. Рассмотрен процесс излучения в зависимости от критической частоты, ниже которой вдоль экспоненциального рупора согласно [7, 8] звук не распространяется. Разработана методика расчёта акустической мощности излучателя с рупором конечной длины, но только для рупора экспоненциальной формы. К тому же, моделью устья рупора принята труба с бесконечным фланцем или полусфера в бесконечном экране, что не оправдано для излучателей, параметр  $kR$  которых лежит в пределах от  $0,7 \leq kR \leq 2$ . Этот же недостаток имеет работа [8].

В работе [8] приводятся расчётные формулы для определения звукового давления, колебательной скорости, импеданса и акустической мощности для рупора бесконечной и конечной длины катеноидальной формы. Для сравнения характеристик рупоров различных форм введён коэффициент отдачи  $\tau$ , равный отношению активной составляющей импеданса в горле к величине удельного акустического сопротивления. Формула коэффициента отдачи, учитывающая эффект отражения прямой волны от устья рупора, выведена в предположении: рупор излучает звук так же, как труба, снабжённая бесконечным фланцем, что является недостатком теории.

Существенный вклад в теорию распространения волн в бесконечных и конечных рупорах внесли работы Л.Я. Гутина [9, 10]. В работе [9] рассмотрено распространение волн в рупорах конической, параболической и экспоненциальной формы конечной длины. Для них Л.Я. Гутин определил коэффициент излучения  $\alpha$  как

$$\alpha = \frac{X(ag - bf_1)}{(f_1\psi X)^2 + (a + f_1\psi Y)^2},$$

где  $X, Y$  – активная и реактивная составляющие импеданса в горле рупора,  $a, b, f_1, \psi$  – некоторые функции, зависящие от величины колебательной скорости в горле и в устье рупора, они вычисляются для рупора конической формы и определенных размеров.

Важным моментом в развитии теории о характеристиках звукового поля, возникающего в среде при излучении звука генератором с рупором, явились работы [11-15] где введено понятие коэффициента направленности и рассчитаны характеристики поля в зависимости от параметров  $kR$ .

## 2. Математическое описание распространения волны в рупоре катеноидальной формы.

При малых амплитудах колебаний волновой процесс в рупоре переменного сечения описывается волновым уравнением [5]

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – потенциал волнового поля,  $S(X)$  – переменная площадь сечения рупора,  $x$  – координата, проходит вдоль оси рупора,  $c$  – скорость звука в среде,  $t$  – время.

Решение волнового уравнения (1) является известным и зависит от вида функции  $S(X)$ . В данной работе сопоставления теоретических и практических результатов будем проводить для рупора катеноидальной формы. В этом случае второй член уравнения (1) имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lg S) = \frac{2}{h} \operatorname{tg} \frac{x}{h}.$$

Тогда площадь сечения изменяется по закону

$$S_2 = S_1 ch^2 \frac{l}{h},$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}$$

где  $h$  – параметр расширения,  $h = \frac{2\pi}{\lambda_{кр}}$ ,  $\lambda_{кр}$  – длина волны на критической частоте,  $S_1$  и  $S_2$  – площади сечения рупора в сечениях при  $x = 0$  и  $x = l$ , где  $l$  – длина рупора. Понятие критической частоты связано с изучением распространения в волн рупорах переменного сечения бесконечной длины.

### 3. Экспериментальные исследования акустических характеристик рупора.

С целью изучения частотной характеристики коэффициента излучения на конкретной модели проведена серия экспериментов. Так как  $\alpha$  есть безразмерная активная составляющая импеданса в горле рупора, то при экспериментальных исследованиях возникает необходимость в определении векторно-фазовых характеристик акустического поля рупора с последующим выделением их действительной части.

Разработана методика экспериментальных исследований акустического поля инфразвукового рупора конечной длины. Методика состоит в определении скалярных и векторно-фазовых характеристик поля экспериментальным путём. В данном случае скалярная величина – уровень звукового давления в горле рупора, векторная – колебательная скорость частиц в горле рупора.

Определение активной и реактивной части импеданса в горле рупора известными методами, основанными на применении в измерениях полудлинноволновой трубы постоянного сечения, в данном случае трудоёмко, так как к горлу рупора необходимо пристыковать трубу длиной не менее 17м.

На первом этапе можно предположить, что колебательная скорость частиц в горле рупора определяется величиной колебательной скорости возбуждающего элемента. В случае поршня это предположение полностью оправдано и  $\zeta_1$  равна  $\zeta_p$  (где  $\zeta_p$  –колебательная скорость поршня). При очень медленно расходящемся сечении рупора (а в случае рупора длиной  $L=10$ м и  $f=17$ Гц существенная расходимость обвода начинается с длины  $L=6$ м) можно предположить, что в горле рупора распространяется плоская волна.

Для измерения акустической мощности здесь достаточно иметь акселерометр, укрепленный на поршне, и микрофон, установленный в горле рупора. Таким методом проведены измерения, описанные в работах [14, 15].

Однако, более точно коэффициент излучения можно определить только с использованием метода измерений векторно-фазовых характеристик в горле рупора. Метод векторно-фазовых характеристик был ранее применён для исследования пространственного распределения основных характеристик инфразвукового поля в замкнутых объёмах [1]. Применим этот метод для определения безразмерной активной составляющей импеданса (или коэффициента излучения  $\alpha$  в горле рупора при возбуждении его на инфразвуковых частотах.

Для определения величины коэффициента излучения  $\alpha$  необходимо измерить мгновенные значения звукового давления  $p_2$  и колебательной скорости  $\zeta_x$  в горле рупора, а также фазовые соотношения между ними. Определить активную составляющую импеданса на основании измерений только  $p_2$  и  $\zeta_x$  возможно лишь в случае простейших полей: в поле плоской

бегущей волны, в дальнем поле свободной цилиндрической и сферической волн. В условиях сложного звукового поля при наличии стоячих волн необходимо знать ещё и фазовые соотношения между  $p_2$  и  $\zeta_x$ .

Величина  $p_2$  – скалярная характеристика звукового поля, измеряемая микрофоном по отработанным методикам.

Величина  $\zeta_x$  – колебательная скорость частиц среды в звуковой волне – величина векторная. В случае сложного звукового поля необходимо рассматривать проекции пространственного вектора колебательной скорости. Амплитуда проекции скорости  $\zeta_x$  на ось X даёт возможность вычислить коэффициент излучения  $\alpha$  в горле рупора

$$\zeta_x = i \zeta_x * e^{-i\varphi_{p_2\zeta_x}}$$

где  $\varphi_{p_2\zeta_x}$  – разность фаз между звуковым давлением и соответствующей проекцией скорости,  $\zeta_x$  – составляющая вектора колебательной скорости, совпадающая с продольной координатой, направленной вдоль оси рупора.

Таким образом, структура звукового поля в горле рупора также вполне может быть определена на основании измерений трёх основных параметров  $p_2$ ,  $\zeta_x$ ,  $\varphi_{p_2\zeta_x}$ . Поэтому экспериментальные исследования звукового поля в горле рупора были основаны на измерении этих трёх величин.

На рисунке 1 представлена схема измерительной аппаратуры.

Для проведения таких измерений необходимо иметь два акустических приёмника: приёмник звукового давления и приёмник колебательной скорости.

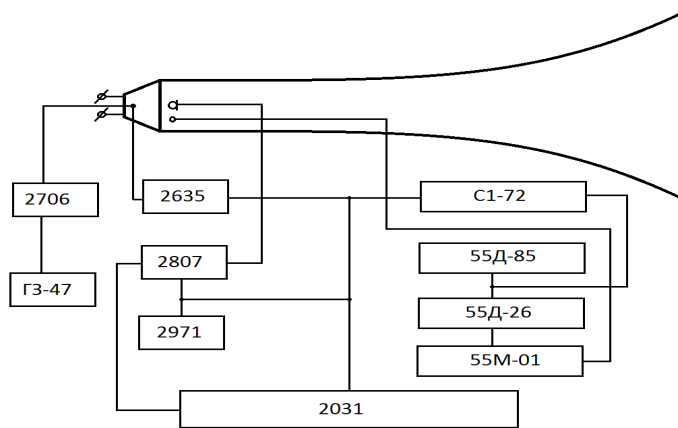


Рис. 1. Схема измерительной аппаратуры. 4344- акселерометр, 2635- предусилитель заряда, 2807- блок питания, С1-72 осциллограф, 2031- анализатор спектра.

В качестве приёмника звукового давления использовался конденсаторный микрофон 4165. В качестве приёмника колебательной скорости был использован акселерометр 4344, сигнал с которого интегрировался на интеграторе. Фаза между  $p_2$  и  $\zeta_x$  фиксировалась фазометром 2971.

При подаче сигналов с задающего генератора ГЗ-47 через усилитель мощности 2706 приводилась в колебательное движение диафрагма громкоговорителя EvM MODEL15L, пристыкованного к горлу катеноидального рупора. В горле рупора непосредственно перед диафрагмой динамика (на расстоянии 0,1м) был установлен микрофон 4165. Акселерометр 4344 устанавливался в центре мембраны громкоговорителя на колею. Данные измерений звукового давления микрофоном 4165 и колебательной скорости центра мембраны громкоговорителя акселерометром 4344 через предусилитель заряда 2635, блок питания 2807, фиксировались визуально на шкалах осциллографа CI-72 и анализатора спектра 2031. Частотный диапазон измерений составил 15-50Гц.

В процессе экспериментальных исследований уровень внешних шумов был ниже измеряемого уровня звукового давления на 15 дБ. Предварительно также было установлено, что амплитудно-частотная характеристика громкоговорителя, применяемого для возбуждения столба воздуха в рупоре, в пределах исследуемых частот является, практически линейной [16, 17]. Применяемая для измерений аппаратура фирмы Брюль и Кьер позволила определить фазовые соотношения  $\varphi_{p2\zeta_x}$  с точностью  $\pm 1$  дБ[18].

Измерения производились согласно требованиям, изложенным в ГОСТ 17187-81 и инструкции по применению аппаратуры фирмы Брюль и Кьер [18].

Перед началом измерений предварительно была проведена калибровка измерительного тракта, для чего была собрана установка, состоящая из цилиндрической трубы постоянного сечения, громкоговорителя и описаного выше комплекта измерительной аппаратуры. Она позволила определить погрешность, вносимую комплектом измерительной аппаратуры в измерения  $\varphi_{p2\zeta_x}$ . С учётом данных калибровки измерительного тракта получено, что  $\varphi_{p2\zeta_x}$  в горле рупора катеноидальной формы близка к  $0^\circ$ , а в горле рупора возбуждалась плоская волна. Фазо-частотная характеристика представлена на рисунке 2.

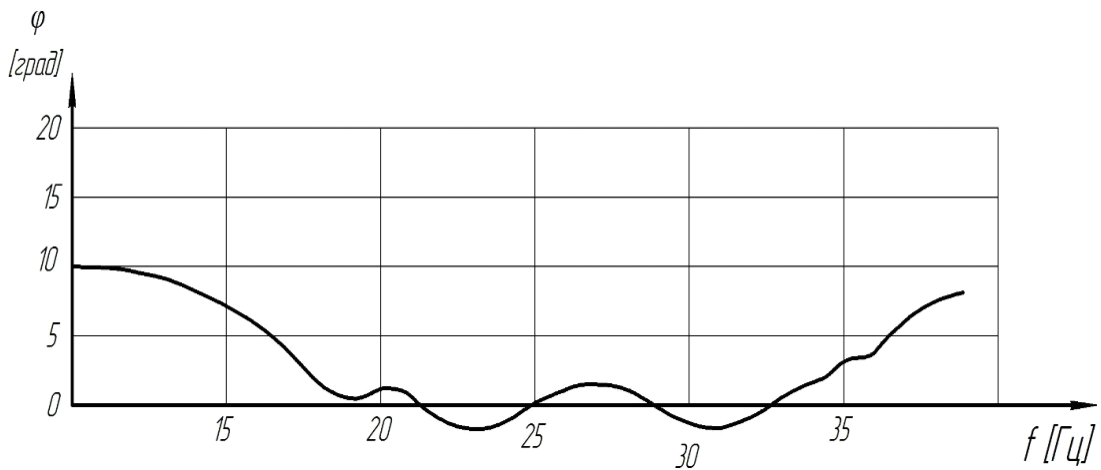


Рис. 2. Фазо-частотная характеристика в горле рупора.

Ввиду того, что звуковое давление измерялось микрофоном, установленным на расстоянии 0,1 м от диффузора громкоговорителя, а колебательная скорость непосредственно на самом диффузоре, было проведено сравнение величины колебательной скорости частиц непосредственно в месте установки микрофона и колебательной скорости поверхности диффузора. Сравнение осуществлялось путём сопоставления электрических сигналов с акселерометра и анемометра. При этом анемометр был установлен рядом с микрофоном 4165. Сравнение колебательных скоростей осуществлялось путём сопоставления показателей электрических сигналов с акселерометра и анемометра. На рисунке 3 представлены данные измерений. В процессе сопоставления данных измерений выявлено, что частицы среды в месте установки микрофона 4165 колебались с той же скоростью, что и поверхность диффузора громкоговорителя. Отмечены отклонения в показаниях анемометра лишь на нескольких из задаваемых частот, не превышающие 15% от номинальных значений. Поэтому вполне достоверным считать расчёт коэффициента излучения  $\alpha$  по данным микрофона и акселерометра.

С целью исключения влияния резонансных явлений электрической части громкоговорителя на чистоту экспериментальных исследований, частотная характеристика звукового давления снималась при постоянном уровне колебательной диафрагмы громкоговорителя  $\zeta_1=0,1$  м/с.

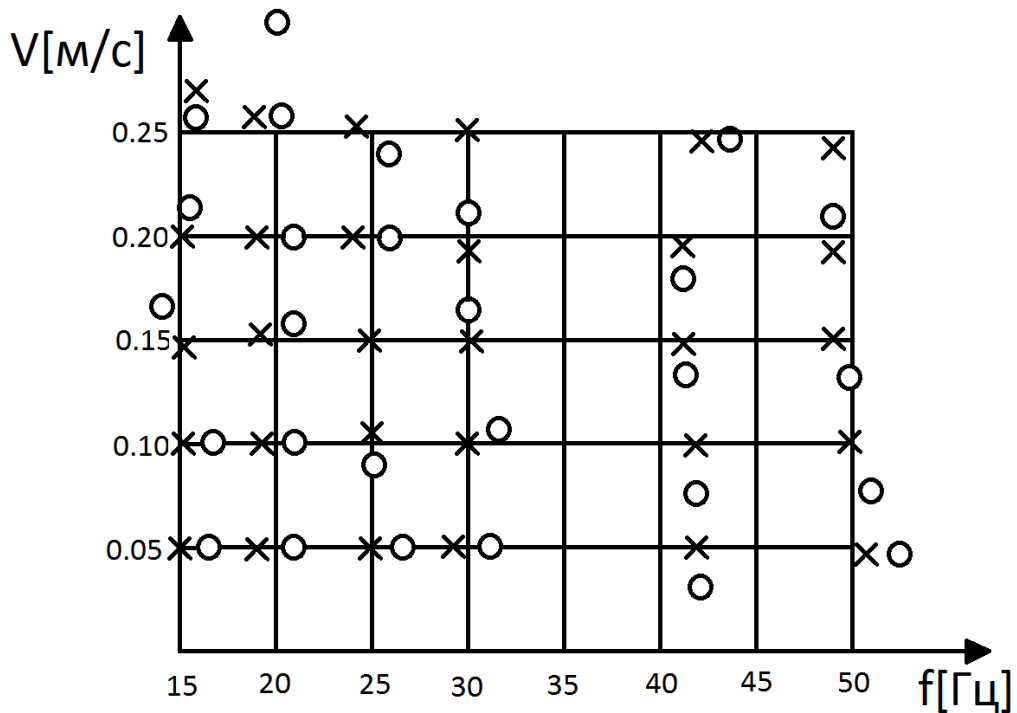


Рис. 3. Показание величины колебательной скорости по анемометру "о" и интегрированием с акселерометра "х"

На рисунке 4 представлены фазо-частотные характеристики безразмерной активной составляющей импеданса в горле рупоров

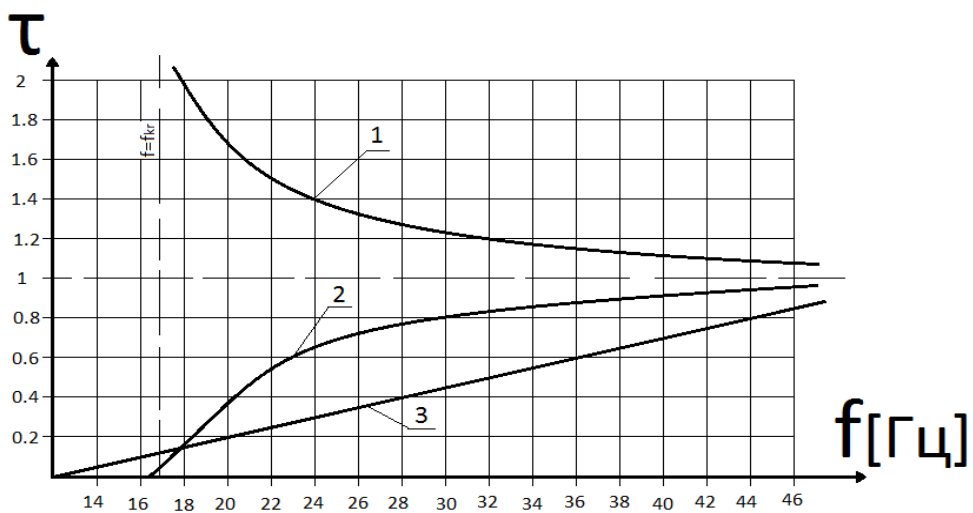


Рис. 4. Амплитудно - частотные характеристики безразмерной активной составляющей импеданса в горле рупоров 1- катеноидальной формы, 2- экспоненциального, 3- конического.



На основании полученных измерительных данных построена частотная характеристика коэффициента излучения  $\alpha$ . Она представлена кривой 2 на рисунке 5. Как видно из рисунка, значения резонансных частот, полученные расчётным путём и экспериментально, полностью совпадают. Амплитудные значения коэффициента излучения разнятся в 0,92 раза.

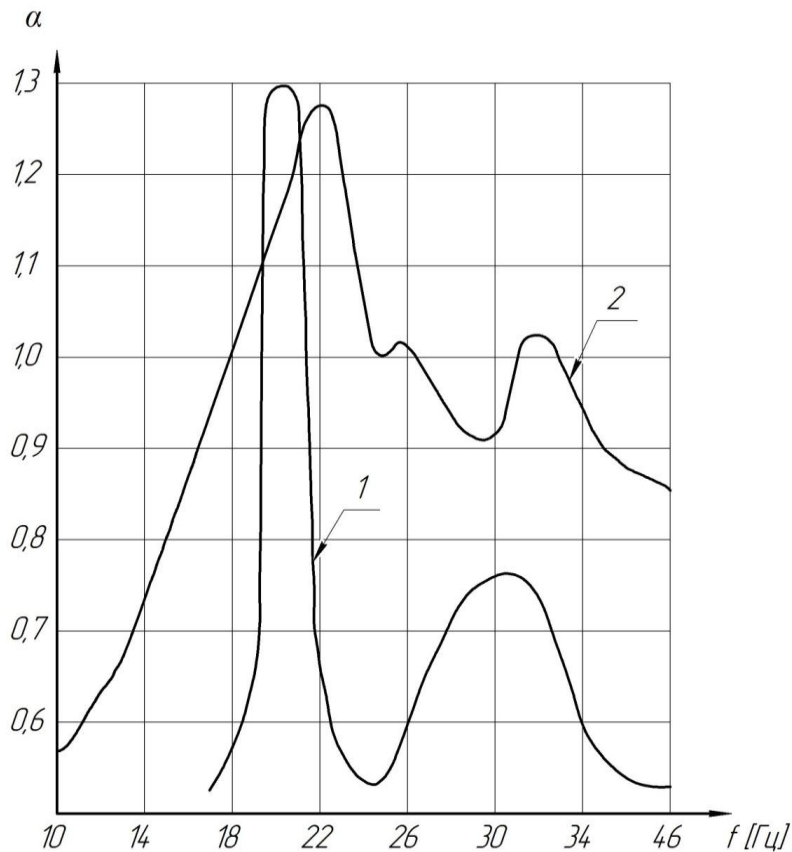


Рис. 5. – Амплитудно-частотная характеристика коэффициента излучения. 1-расчетные значения, 2-экспериментальные для рупора  $l=10$  м,  $R_1=0,17$  м,  $R_2=2$  м.

Измерения амплитудно-частотной характеристики коэффициента излучения показали, что акустическая мощность была максимальной на резонансных частотах излучения  $f_1=19,5$  Гц,  $f_2=30$  Гц,  $f_3=52$  Гц. При этом параметр  $kR_2$  рупора соответственно составлял величины  $kR_2=0,74$ ;  $kR_2=1.15$ ;  $kR_2=1.7$ .

С целью расчёта акустической мощности генератора на этих частотах были определены три его характеристики направленности. Они представлены на рисунке 5 видно из рисунка, на частотах  $f_1$ ,  $f_2$  направленность излучения отсутствует, характеристика направленности является круговой. Направленность излучения появилась на резонансной частоте  $f_3 = 52$  Гц. По данным измерений рассчитанная акустическая мощность устройства  $W_H=0,3$  Вт и коэффициент концентрации  $\Omega=1,6$ .

На рисунке 6 приведены характеристики направленности рупора.

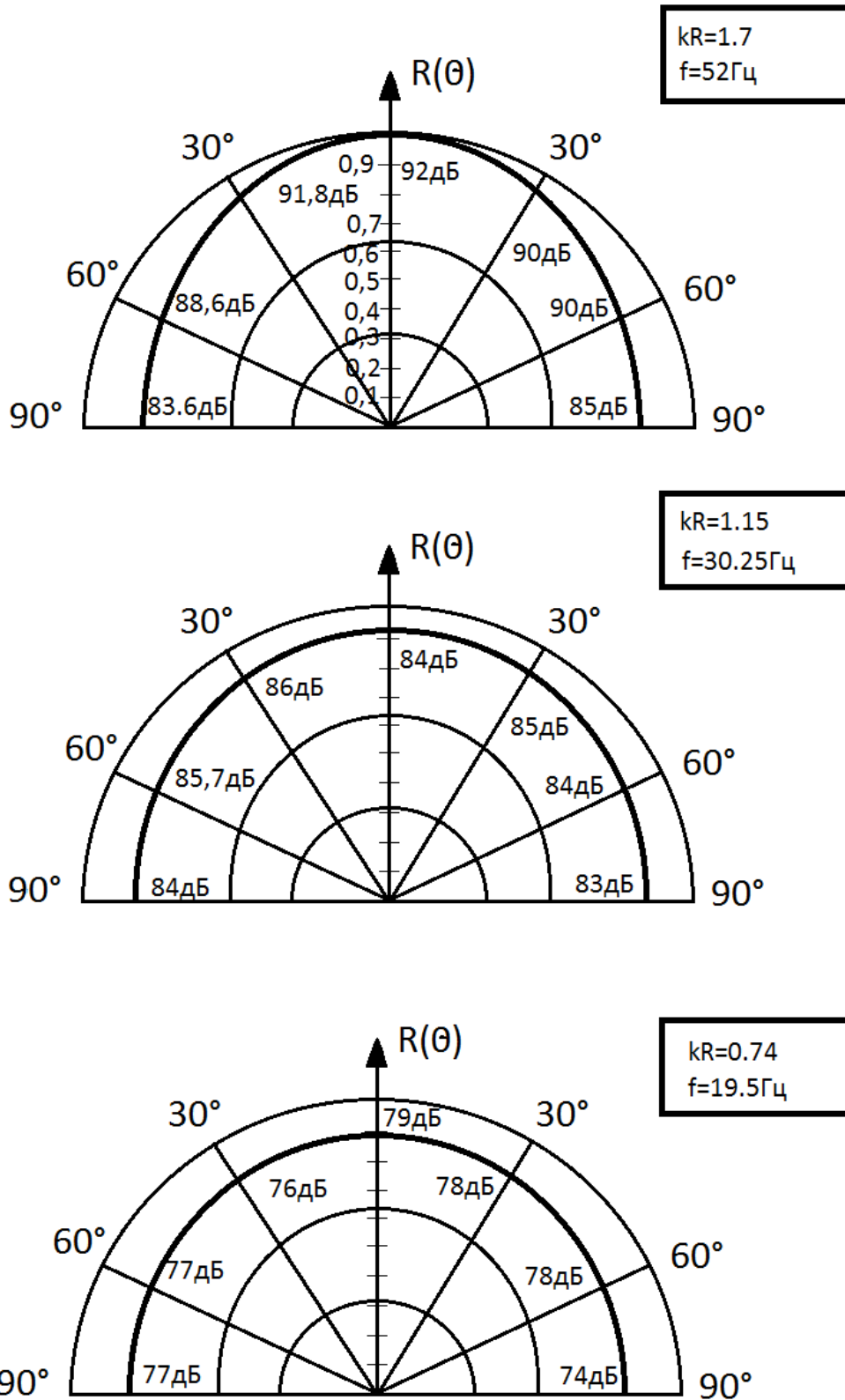


Рис.6. Характеристики направленности рупора

На рисунке 7 приведён внешний вид рупора катеноидальной формы.



Рис.7. Внешний вид катеноидального рупора.

#### **Выводы.**

1. Анализ работ, выполненных ранее по усилению звука рупорами, показал, что исследования излучений волн акустическими излучателями с применением рупоров в инфразвуковом диапазоне частот ранее не проводилось.

3. Разработана методика измерений амплитудно-фазовых характеристик акустического поля в полости рупора на инфразвуковых частотах.

4. Экспериментально получена амплитудно-частотная характеристика безразмерной активной составляющей импеданса (коэффициента излучения) в горле рупора катеноидальной формы.

#### **Библиографические ссылки**

1. Иванников А.Н. Метод исследования структуры звукового поля в малых замкнутых объёмах воздуха. Дис.канд.физ.-мат. Наук (Моск.гос.ун-т им. М.В. Ломоносова, физ.фак.). – М., 1983. – 140с.

2. Захаров Л.Н., Ржевкин С.Н. Векторно-фазовые измерения в акустических полях. / Акустический журнал. – 1974. – т. 20, вып. 3. – С. 393-401.

3. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. [Текст] / В. А. Гордиенко, Л. Н. Захаров. – М. :Наука, 1989. – 222 с.

4. Шкуратник В. Л. Методы и средства изучения быстропротекающих процессов. Учебник для вузов [Текст] / В. Л. Шкуратник, А. С. Вознесенский, И. В. Колодина – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 309 с.
5. Webster A.G. Acoustical Impedance and Theory of Horns and Phohorn. – I. Franke.Inst. – 1977. – V.203, №1 – P.85-102.
6. Крендалл И.Б. Акустика. – Л.: Гостехиздат. 1934. – 171с.
7. Харкевич А.А. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы. – М.: Наука, 1973, т.1. – 397с.
8. Морз Ф. Колебания и звук. – М.: Гостехиздат. 1937. – 465с.
9. Гутин Л.Я. К теории приёмного рупора. В кн.: Избранные труды. – Л.: Судостроение, 1977. – С. 37-55.
10. Гутин Л.Я. О звуковом поле поршневых излучателей. – ЖТФ. – 1937. – т.7, вып.10. – С. 1096-1106.
11. Сапожников М.А. Элетроакустика. – М.: Связь, 1978. – 272с.
12. Фурдуев В.В. Динамика электроакустического преобразователя.
13. Дрейзен И.Г. Электроакустика и звуковое вещание. – М. : Связь-издат, 1961. – 544с.
14. Сухаревский Ю.М. О направленном действии экспоненциального рупора. – Электросвязь. – 1956. – №4. – С. 73-96.
15. Головин Н.Я. Акустические артиллерийские приборы / Под ред. В.В.Мечникова. – Л: Издание Артиллерийской ордена Ленина академии РККА им. Ф.Э.Дзержинского, 1938, т. II. – 218с.
16. Косько И.К.,СоколГ.И. Излучение инфразвука катеноидальным рупором конечной длины. – Днепропетровск:ДГУ, деп. ВИНТИ от 9 сентября 1983, №5189-83 Деп., 18с., библи. 22.
17. Драган С.П., Косько И.К., Пирожков М.В., Сокол Г.И. Исследование характеристик в горле рупора близ критической частоты. – Днепропетровск: ДГУ, Деп.ВИНИТИ от 24 июля 1985, №5371-85 Деп., 7с , библи. 5.
18. Брех Е.Т. Применение аппаратуры фирмы ”Брюль и Кьер” для измерений акустического шума. – Дания: ” Брюль и Кьер”, 1971. – 224с.