

## Акустические устройства дальнего действия ( 130дБ на 50м с помощью пьезокерамики! )

*Гейер А.Ф.*

Маковки на теремах покривились,  
Стёклышки в оконницах полопались,  
Со двора все кони разбежались,  
Все князья с боярами пали замертво.

(Из былины «Илья Муромец и Соловей-разбойник»)

Интересно произвести расчёт акустической мощности, создаваемой былинным персонажем для создания такого эффекта. Оставим в области фантастики «маковки на теремах» и «стёклышки в оконницах», а вот чтобы у князей с боярами пошла кровь из ушей необходимо создать звуковое давление 160дБ или 2000Па.

Если свист Соловья-разбойника не имеет преимущественного направления в пространстве, то акустическую мощность  $P_a$  можно вычислить по формуле:

$$P_a = \frac{4\pi p^2 R^2}{c\rho} . \quad (1)$$

В этой формуле  $p$  – звуковое давление (2000 Па);  $R$  – характерное расстояние до объекта воздействия (возьмём в расчёт 30м – размер княжеского двора);  $c$  – скорость звука (340м/с);  $\rho$  - плотность воздуха (1,25 кг/м<sup>3</sup>). Подставим эти исходные данные в формулу и посмотрим, что получится.

$$P_a = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 2000^2 \cdot 30^2}{340 \cdot 1,25} \text{ (Вт)} = 106\,390\,588 \text{ Вт.}$$

Заметим, что мы вычислили акустическую, то есть полезную мощность излучения. Может быть Соловей-разбойник и умел производить свист со 100%-ным КПД, но сегодня не известны технические средства, которые могли бы преобразовать, например, электрическую энергию в энергию звуковых колебаний с КПД более, чем 10 – 15%. С учётом этого, чтобы создать упомянутый эффект, необходима мощность 20 гидроэлектростанций, подобных Саяно-Шушенской. Такая простая количественная оценка позволяет сделать важный вывод о том, что не может быть реализовано техническое средство для создания непрерывного звука такой громкости, чтобы нанести необратимый вред здоровью человека. Звуковое давление 160 децибел можно создать в виде очень короткого импульса, что имеет место при взрыве авиабомбы. Опытные солдаты второй мировой войны во время бомбардировки старались держать рот широко открытым, чтобы давление на барабанную перепонку не было односторонним. Перепад давления, эквивалентный 160 дБ или 2000 Па,

соответствует внезапному перемещению на высоту 3,5 км. Только благодаря сравнительно медленному набору высоты пассажиры самолёта ощущают лишь небольшое давление в ушах.

Рассчитаем и занесём в таблицу значения мощности излучения, необходимые для того, чтобы обеспечить некоторые величины звукового давления на определённых расстояниях.

Таблица 1

Звуковое давление	Излучаемая мощность в ваттах при заданном звуковом давлении, наблюдаемом на расстоянии:		
	0,1м	1,0м	10м
<b>160дБ</b> (необратимый вред здоровью)	1200	120000	12000000
<b>130дБ</b> (болевого порог)	1.2	120	12000
<b>120дБ</b> (ощущение сильного дискомфорта)	0,12	12	1200
<b>110дБ</b> (полная громкость концертной аудиотехники)	0,012	1,2	120

Напомним, чтобы излучить звук с такими значениями акустической мощности необходимо подвести на порядок больше электрическую мощность, так как электроакустические преобразователи крайне неэффективны. Из всех типов электроакустических преобразователей наиболее эффективен пьезокерамический. Он может преобразовать в звук до 15% электрической мощности, однако, оговоримся, на резонансной частоте. Даже при вполне умеренных громкостях звучания, 110-130дБ, (если можно их назвать умеренными) мощность, которую необходимо подвести к преобразователю, чрезвычайно велика, особенно если такую громкость надо обеспечить на значительном расстоянии. Эта задача становится вполне разрешимой, если излучение сосредоточить в узком телесном угле, отказавшись от ненаправленного излучения. Так, если звук направить в полусферу (телесный угол 180°), то потребуется вдвое меньшая мощность. Если угол расхождения луча 10°, то требуемая мощность в 500 раз меньше.

Направить излучение в пределах узкого телесного угла, в принципе, несложно. Для этого необходимо взять достаточное количество отдельных электроакустических преобразователей, расположить их в одной плоскости возможно ближе друг к другу и заставить колебаться на одной частоте, с

одинаковой фазой и с одинаковой амплитудой. При этом должно выполняться условие: размер такой системы должен многократно превышать длину волны звука в воздухе. Такая система будет излучать плоскую волну до расстояния  $r$ , равного:

$$r = d^2 / \lambda \quad (2)$$

Здесь  $d$  – размер излучающей системы,  $\lambda$  - длина волны звука. Расстояние  $r$  – это так называемая ближняя зона. Звуковое давление в ближней зоне постоянно от 0 до  $r$ . На расстоянии больше  $r$  (дальняя зона) звуковой луч начинает расходиться, а звуковое давление падать пропорционально расстоянию. Так, каждое удвоение расстояния уменьшает громкость вдвое, или на 6 децибел. При этом угол расхождения луча  $\theta$  будет определяться по закону:

$$\theta = \arcsin(\lambda / d) . \quad (3)$$

Эти известные теоретические сведения относятся к модели, представляющей собой плоскость, колеблющуюся параллельно себе. В непосредственной близости от реальной системы электроакустических преобразователей звуковое поле, очевидно, не является однородным. Логично предположить, что воображаемая поверхность на удалении порядка периода расположения преобразователей или, что то же самое, их поперечного габарита, будет соответствовать теоретической модели.

Сформулируем теперь основные соображения по осуществлению мощного направленного излучателя звука.

**1) Частота звука.** Дальность действия излучателя пропорциональна расстоянию  $r$  ближней зоны, которое, в свою очередь, пропорционально  $1/\lambda$ , то есть частоте. Поэтому частоту надо выбрать возможно выше, но не более чем около 3кГц, так как на более высоких частотах чувствительность органов слуха уменьшается.

**2) Размер и форма излучающей системы.** Размер ближней зоны и, соответственно, дальность пропорциональны размеру  $d$  излучающей системы. Так, если  $d = 10 \lambda$ , размер ближней зоны будет равен 10 метров. В пределах десяти метров громкость не уменьшается. На 20 метрах громкость будет вдвое или на 6дБ меньше, на 40м – вчетверо или на 12дБ и т.д. Если излучающая система выполнена в виде квадрата или круга, то звуковой луч расходится одинаково по вертикали и горизонтали. Если излучающая система вытянута (прямоугольник, овал), то размеры ближних зон и расхождение луча будут разными во взаимно перпендикулярных плоскостях. Большой размер излучателя формирует более узкий луч.

**3) Электроакустический преобразователь.** Дальность действия – это расстояние от излучателя до точки, где наблюдается величина звукового давления, заданная из каких-либо произвольных критериев. Дальность зависит от размера ближней зоны и звукового давления в её пределах.

Экспериментальный факт: звуковое давление в ближней зоне такое же и не может быть больше, чем развиваемое отдельным электроакустическим преобразователем на расстоянии от себя, равном своему же диаметру.

Таким образом, конфигурация ближней зоны определяется размерами излучающей системы, а звуковое давление в её пределах – отдельным электроакустическим преобразователем и не зависит от их количества. Важно заметить, что дальность действия направленного излучателя существенным образом зависит от качества преобразователя. Не меняя размеров излучателя и количества преобразователей, но применив преобразователь, который звучит всего на 6дБ громче, можно вдвое увеличить дальность действия.

Используя эти соображения, составим общую таблицу (табл.2) зависимости звукового давления от расстояния, которую легко конкретизировать для любого излучателя, имеющего форму квадрата или шестиугольника. Такая форма – результат плотной компоновки преобразователей. Расстояние от излучателя будем указывать кратным  $r$ .

Таблица 2

Расстояние от излучателя, м	$r$	$2r$	$4r$	$8r$	$16r$
Звуковое давление, дБ	$p_0$	$p_0 - 6$	$p_0 - 12$	$p_0 - 18$	$p_0 - 24$

В этой таблице  $r$  – размер ближней зоны, рассчитываемый по формуле 2;  $p_0$  – звуковое давление отдельного преобразователя, измеренное на расстоянии, равном его поперечному размеру.

Перейдём теперь к конкретным случаям. В качестве примера рассчитаем основные характеристики двух вариантов направленных излучателей. В первом варианте количество преобразователей 100 шт., во втором варианте – 16. Результат расчёта по второму варианту в дальнейшем пригодится для оценки реального макета направленного излучателя, составленного из 16 преобразователей. В расчёте предполагаем применение пьезокерамических электроакустических преобразователей, описанных в статье «Пьезокерамические излучатели звука» ([www.avrora-binib.ru](http://www.avrora-binib.ru)). Диаметр преобразователя 10см. Звуковое давление на расстоянии 10см – 144дБ. Частота звука 2,9кГц ( $\lambda = 12$  см). Для первого варианта размер излучателя 1м, для второго - 0,4м.

#### **Расчёт звукового давления в зависимости от расстояния.**

Вычислим по формуле 2 размер  $r$  ближней зоны. Для первого варианта он составит 8,3м. Для второго – 1,3м. Составим таблицу звуковых давлений (табл. 3). Нетрудно заметить, что дальность действия пропорциональна площади излучателя.

Таблица 3

Вар. I	Расстояние от излучателя, м	8,3	16,6	33,2	66,4	132,8
	Звуковое давление, дБ	144	138	132	126	120
Вар. II	Расстояние от излучателя, м	1,3	2,6	5,2	10,4	20,8
	Звуковое давление, дБ	144	138	132	126	120

### Углы расхождения звуковых лучей

Соответствующие углы расхождения звуковых лучей  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , рассчитанные по формуле 3, составят:

$$\theta_1 = \arcsin 0,12/1 = 6,9^\circ;$$

$$\theta_2 = \arcsin 0,12/0,4 = 17,5^\circ.$$

### Расчёт акустической мощности

Видоизменим формулу 1, используя то обстоятельство, что в ближней зоне имеет место плоская волна с площадью, равной площади излучателя. Тогда получим следующую простую расчётную формулу:

$$P_a = \frac{p_0^2 s}{425}, \quad (4)$$

В которой  $p_0$  - звуковое давление в Па отдельного преобразователя на расстоянии, равном его диаметру;  $s$  - площадь излучателя в м<sup>2</sup>. Вычисленная по этим формулам акустическая мощность для первого варианта составит:

$$P_a(1) = \frac{320^2 \cdot 1}{425} = 241 \text{ Вт}, \text{ для второго варианта: } P_a = \frac{320^2 \cdot 0,16}{425} = 38,6 \text{ Вт}.$$

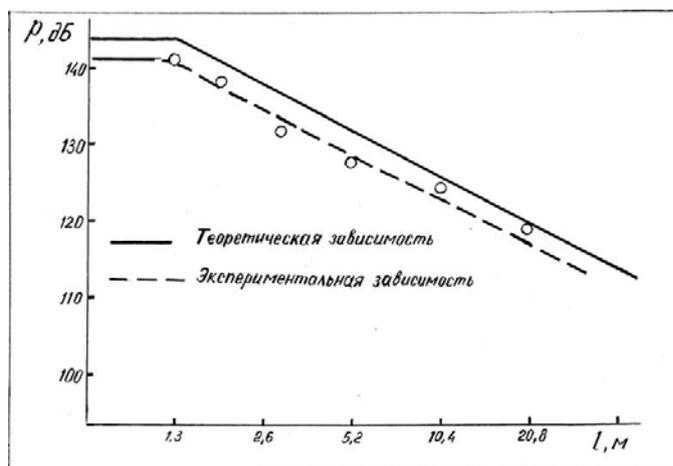
Таковы результаты расчёта основных характеристик направленного излучателя. Теперь представим реальный макет излучателя. Он имеет размер 0,4 x 0,4 м и состоит из 16 электроакустических преобразователей. На рис 1 показано фотоизображение макета со стороны его излучающей поверхности. Для обеспечения когерентности преобразователи соединены параллельно с учётом полярности пьезоэлементов. Излучатель функционирует от специально сконструированного генератора прямоугольных колебаний амплитудой 48 В с частотой 2,9 кГц. Для более точной настройки в резонанс предусмотрена плавная регулировка частоты. В качестве источника питания



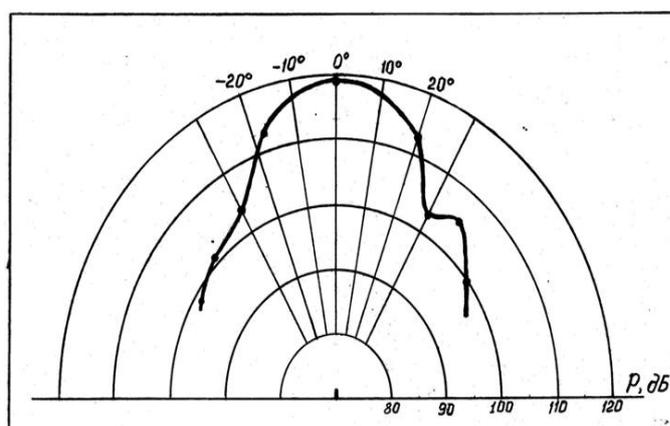
**Рис.1.** Макет направленного излучателя.

использовались аккумуляторы 12В, 7А-ч, соединённые последовательно 4 шт. Звуковое давление измерялось шумомерами ВШВ-003 и CENTER-320. На рисунках 2 и 3 представлены основные характеристики излучателя – зависимость звукового давления от расстояния и диаграмма направленности излучения.

В порядке обсуждения результатов измерений отметим следующее. Для удобства сравнения расчётной и экспериментальной зависимостей расстояние по оси абсцисс на рис.2 отложено по логарифмической шкале, так как в этом случае расчётный график – прямая линия. Экспериментальная зависимость несущественно отличается от линейной и скорее обусловлена методическими некорректностями. Звуковое давление на 2,5дБ ниже расчётного, то есть того, какое следовало бы ожидать, если бы была обеспечена более высокая идентичность преобразователей. Угол расхождения звукового луча (Рис.3) также близок к расчётному.



**Рис.2.** Расчётная и экспериментальная зависимости звукового давления от расстояния от излучателя.



**Рис. 3.** Диаграмма направленности макета направленного излучателя.

Далее, представляет интерес сравнить фактически полученное значение акустической мощности, отдаваемой излучателем, которая соответствует звуковому давлению 141,5дБ с расчётной мощностью, когда за основу принималось 144дБ, и электрической мощностью, подводимой от источника питания. 141,5дБ соответствует абсолютному звуковому давлению около 135Па. Тогда, воспользовавшись формулой (4), получим значение фактической акустической мощности 21 ватт. Нереализованные 2,5дБ уменьшили мощность излучения на 45%! Исследуемое устройство потребляло от батареи аккумуляторов напряжением 48В ток 4,5А. Стало быть потребляемая электрическая мощность составила 216Вт. Таким образом, исследуемый образец преобразовал в звук около 10% подведённой мощности.

В начале этой статьи было сделано утверждение об отсутствии технических средств для создания непрерывного звука, который мог бы нанести необратимый вред здоровью человека. В 2004 году компанией American Technology Corp. были разработаны акустические установки дальнего действия, которые успешно распугивали сомалийских пиратов. В Интернете

нет недостатка информации об этих установках. Наиболее мощная установка LRAD-1000X (Long Range Acoustic Device), по опубликованным данным, имеет излучатель (эмиттер) площадью  $0,57\text{ м}^2$  и создаёт звуковое давление 152 дБ на расстоянии 1 м. Но ведь это же не так далеко от критических 160 дБ! При этом установка потребляет мощность источника питания 480 ватт. Однако, в свете сделанных выше расчётов, касающихся энергопотребления, возникает сомнение в корректности такого утверждения. Вычислим акустическую мощность, излучаемую установкой LRAD-1000X. Из формулы

$$152\text{ дБ} = 20\lg \frac{P}{P_0},$$

Где  $P_0 = 20 \times 10^{-6}$  Па, определим абсолютное значение в Па звуковое давление  $P$ . В результате получим 794 Па. Воспользовавшись формулой (4), получим значение акустической мощности:

$$P_a = \frac{794^2 \cdot 0,57}{425} = 845\text{ Вт}.$$

Нельзя получить акустическую мощность 845 ватт, потребляя от источника питания 480 Вт! Какое же, на самом деле, звуковое давление в ближней зоне LRAD-1000X? Пользуясь опубликованными данными, вычислим размер ближней зоны. Он равен 5,3 м. Используя табл.2 определим, что на расстоянии, к примеру, 8 г (42 м) звуковое давление должно быть 134 дБ. На самом деле, по опубликованному графику имеем 120 дБ. Это означает, что показатель 152 дБ завышен на 14 дБ и, на самом деле, в ближней зоне, в том числе на расстоянии 1 м звуковое давление должно быть 138 дБ. Тогда акустическая мощность составит 27,4 Вт. Это около 6% от максимально потребляемой мощности. Если характеристики приведены не для форсированного режима, то результат совершенно непротиворечив. Угол расхождения луча установки LRAD-1000X составляет  $10^\circ$ , что согласуется с формулой (3).

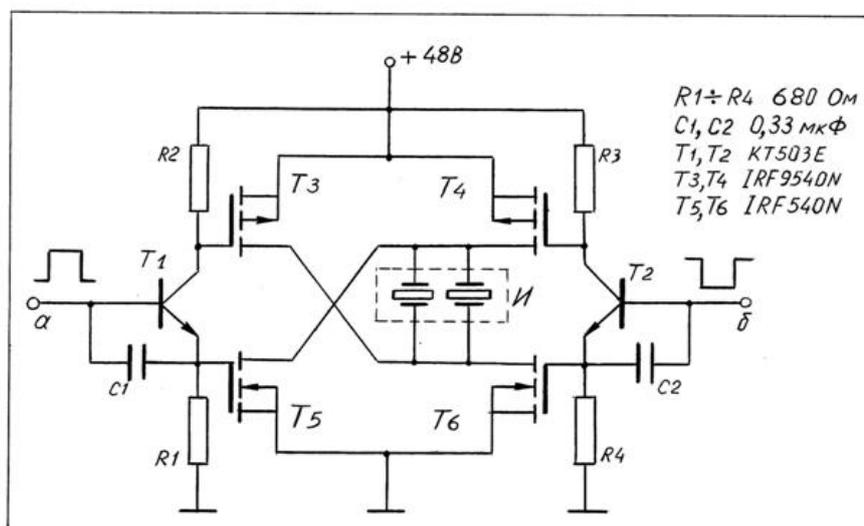
Аналогичная некорректность допущена также в сообщении «Техноком групп», «Акустический прибор дальнего действия АПДД-500В» ([www.tecnocom.ru](http://www.tecnocom.ru)).

### **Проблемы и недостатки**

Выполненное предварительное исследование показало, что на основе общеизвестных теоретических результатов можно с уверенностью прогнозировать характеристики направленных излучателей звука. Во-вторых, вышеуказанные пьезокерамические электроакустические преобразователи, будучи применённые в направленных излучателях звука, имеют потенциал получить беспрецедентные показатели по дальности действия. Испытание действующего макета позволило выявить проблемы и недостатки, что, в общем-то, не является неожиданностью. Они позволяют определить предмет и направление дальнейших исследований. Остановимся на некоторых проблемах.

1. Конструктивное исполнение макета. Как видно из рис.1, излучатель состоит из четырёх блоков по четыре преобразователя. Это не дало возможность скомпоновать излучатель идентичными преобразователями. Для формирования плоской волны в ближней зоне и получения малого угла расхождения звукового луча требуется обеспечить равномерное амплитудно-фазовое распределение колебаний излучающих элементов. Равномерность фазового распределения обеспечивается автоматически, параллельным соединением преобразователей. Необходимо, лишь обеспечить постоянство амплитуды комплектованием преобразователей, преимущественно по резонансной частоте.

2. Звуковой генератор. Особенностью возбуждения звуковых колебаний излучателя является то, что генератор должен отдать в нагрузку значительную мощность и чтобы нагрузка была способна потребить эту мощность. Наиболее простые схемы генераторов, предназначенные для работы с пьезокерамическими сигнальными устройствами, выдают несинусоидальное напряжение. При этом отсутствуют какие-либо отрицательные проявления. Для работы с макетом направленного излучателя также был изготовлен генератор несинусоидальных колебаний. Принципиальная схема генератора была разработана инженером Яковлевым А.И. Оконечное устройство генератора приведено на рис.4. Как видим, схема чрезвычайно проста и не нуждается в особых комментариях. Схема управляется разнополярными импульсами со



**Рис.4.** Принципиальная схема окончного устройства генератора для питания макета направленного излучателя звука.

со скважностью 2, подаваемыми на базы транзисторов  $T_1 T_2$  – «расщепителей» фазы. Мостовой ключ на мощных полевых транзисторах обеспечивает подачу на излучатель напряжения от источника питания (аккумуляторы) со сменой полярности со звуковой частотой. Таким образом, на выходе генератора (на излучателе) действует прямоугольное разнополярное напряжение. Механические же колебания электроакустических преобразователей являются гармоническими. Поэтому излучатель представляет собой нагрузку только для

первой гармонике. Высшие же гармоники не востребованы. Их доля в энергетическом балансе составляет 14,6% и, при больших мощностях, приносит ощутимый вред. Так, имели место случаи разрушения пьезоэлементов, выхода из строя транзисторов моста и других элементов схемы генератора.

3. Электроакустический преобразователь. В силу традиции, в преобразователе применены пьезоэлементы из сегнетомягкой пьезокерамики. Наряду с более высокой пьезоактивностью сегнетомягкой пьезокерамике свойственны повышенные диэлектрические потери, особенно в области сильных полей. Так, согласно техническим условиям (ОСТ 11 0444-87), пьезокерамика марки ЦТСНВ-1, которая использована в упомянутых преобразователях, имеет тангенс угла диэлектрических потерь 1,9% в слабых полях и 30% в сильных полях. У сегнетожестких марок пьезокерамики  $\text{tg } \delta$  в слабых полях менее 1% и в сильных полях – единицы процентов. Слабым полем считается напряжённость до 25В/мм. Сильные поля – от 300В/мм. Учитывая, что толщина пьезоэлементов преобразователей 0,3мм, получим, что для них слабые поля ограничиваются напряжением 7,5В. Амплитуда рабочего напряжения 48В соответствует напряжённости поля 160В/мм. В этом случае уменьшается эффективность преобразования, не реализуются несколько децибел звукового давления. Из-за разогрева пьезоэлементов ограничивается время звучания.

Решение перечисленных и некоторых других проблем сделает реальным создание надёжной установки, которая бы обеспечила звуковое давление 130дБ на расстоянии 50м.

### **Заключение**

Поразителен динамический диапазон звуков, воспринимаемых человеческим ухом. Звуковое давление самого слабого звука отличается от самого сильного (болевой порог) почти в три миллиона раз! Соответствующие значения интенсивности (энергетическая характеристика, Вт/м<sup>2</sup>) отличаются в 10 000 000 000 000 раз! На пределе слышимости звуковое давление всего 20 микропаскаль, а интенсивность этого звука совершенно микроскопическая, порядка 10<sup>-12</sup> Вт/м<sup>2</sup>. Именно этим свойством человеческого уха объясняется возможность дальней связи посредством азбуки Морзе довольно простыми радиостанциями времён второй мировой войны.

Напротив, создавая звук на другом конце динамического диапазона, мы наблюдаем такие значения интенсивности звуковых колебаний, что возникают технические проблемы для их осуществления.

Мы показали реальность создания мобильной установки, которая может обеспечить звуковое давление 130дБ на 50 метрах. Для создания такого звукового давления на 50м требуется 100 высокоэффективных преобразователей и мощность источника питания 2 – 2,5кВт.

Дальнейшее увеличение этих показателей становится невозможным или нецелесообразным из-за проблем энергообеспечения (громоздкости системы питания) т.к. каждые 3 децибела звукового давления требует удвоения

потребляемой мощности. Разумеется нет принципиальных ограничений для создания эдакого стационарного Соловья-разбойника с электроподстанцией.

*При подготовке статьи использованы следующие источники информации:*

1. *Физический энциклопедический словарь, 1960, т., стр. 39.*
2. *Гейер А.Ф. «Пьезокерамические излучатели звука», статья на сайте: [www.avrora-binib.ru](http://www.avrora-binib.ru).*
3. *ОСТ11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия.*
4. *«Акустический прибор дальнего действия». Сообщение на сайте: [www.tecnocom.ru](http://www.tecnocom.ru).*