

Ультразвуковые пьезокерамические преобразователи с плоско-сферической диафрагмой

А.Ф.Гейер, А.В.Земляков, С.А.Парпула, В.А.Пономарев

В данной статье описываются основные результаты работы по ультразвуковым пьезокерамическим преобразователям, выполненные в ходе предварительных исследований, реализации программы УМНИК [6] и последующих работ по развитию ультразвуковых воздушных преобразователей [7].

Сфера использования воздушных ультразвуковых преобразователей чрезвычайно широка. Существуют классы акустических устройств с использованием таких преобразователей. К ним, например, относятся: извещатели (датчики) охранные объёмные для систем безопасности, отпугиватели животных (птицы, собаки, грызуны), ультразвуковые эхо-локаторы для ориентирования слепых, течеискатели с использованием ультразвукового контроля и ультразвуковые генераторы, парктроники и др. На основе ультразвуковых преобразователей создаются многочисленные акустические измерительные приборы. К ним относятся:

- Приборы измерения уровня жидкости (включая слабые кислоты, щелочи, водоснабжения, канализации и др.), сыпучих материалов (строительные смеси, сельскохозяйственные хранилища и др.);

- Приборы для бесконтактного измерения расстояний: прибор измерения расстояния земля-электропровод, приборы для измерения габаритов мостов, путепроводов 3,5-15м;

Имея в виду, что проводимые исследования предполагают создание ультразвуковых преобразователей нового конструктивного типа со значительно превосходящими техническими характеристиками, то можно в перспективе ожидать появления принципиально новых областей применения. В частности, можно предположить их использование в системах управления автотранспортом, в том числе исключая место водителя, в числе средств непрерывного мониторинга дорожной обстановки. Для такой цели существующая продукция непригодна, ввиду широкой диаграммы направленности и незначительного радиуса действия.

В качестве основы для исследований, имеющих конечной целью создание ультразвуковых преобразователей принимается техническое решение по электроакустическому преобразователю с плоско-сферической диафрагмой [1]. Устройство преобразователя представлено на рисунке 1.

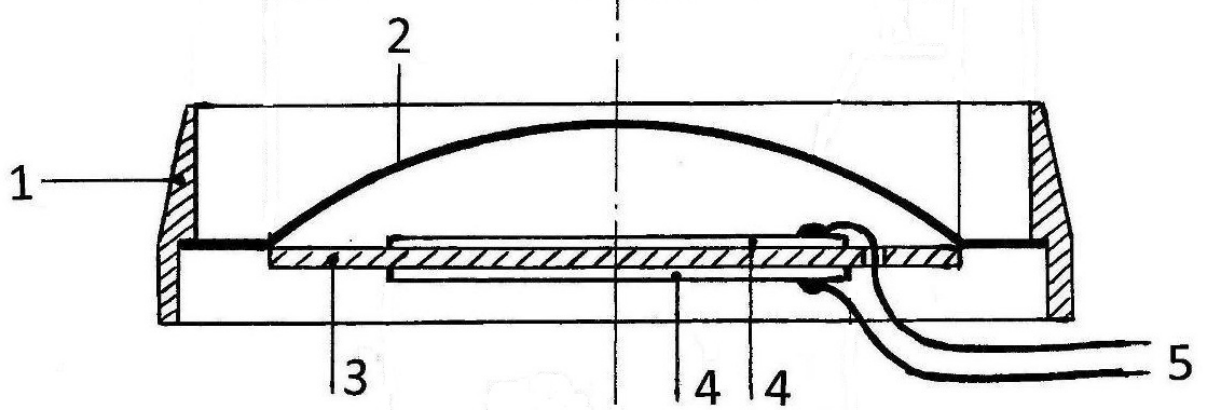


Рисунок 1 - схематический вид электроакустического преобразователя. 1 – корпус, 2 – диафрагма, 3 – мембрана, 4 – пьезопреобразователи, 5 – провод.

Излучающей поверхностью преобразователя является наружная часть диафрагмы, которая состоит из сферической и плоской частей. Диафрагма приводится в колебательное движение биморфным пьезопроводом, закреплённым по своей периферии в основании сферической части диафрагмы. При этом сама диафрагма по наружной окружности плоской части закреплена в оправке или в цилиндрической части корпуса.

1. Геометрические размеры преобразователя

При проведении предварительных исследований была выявлена следующая закономерность, касающаяся отношения диаметров пьезоэлемента и мембраны, составляющих биморфную структуру

$$\frac{d_{\text{п}}}{d_{\text{м}}} \approx 0,625.$$

Задача по определению размеров биморфных пьезопреобразователей для резонансных частот 20 кГц и 40 кГц решалась экспериментально, так как теоретический расчёт резонансной частоты для диска ступенчато-переменной толщины весьма сложен. Представляет интерес определить диаметры мембраны при разных значениях её толщины. В процессе исследований изготавливались экспериментальные образцы пьезопреобразователей с использованием стальных мембран толщиной 0,3мм.; 0,5мм.; 1,0мм и 2мм. Использовались пьезоэлементы из пьезокерамики ЦТСНВ-1 [2] толщиной 0,15мм для мембран 0,3мм; 0,25мм для мембран 0,5мм; 0,4мм для мембраны 1,0мм и 0,6мм для мембраны 2мм.

Определение размеров преобразователей осуществлялось методом последовательных приближений. Сначала грубо оценивался диаметр мембраны, изготавливался образец преобразователя и измерялась его частота. Затем, при

фиксированной толщине мембраны, изготавливался образец с более точным приближением, имея в виду соотношение [3]

$$v \sim d^2.$$

Обычно, чтобы определить размер, соответствующий заданному допуску по частоте, достаточно трёх ступеней последовательных приближений. Обобщая результаты данного метода, была построена номограмма, представленная на рисунке 2.

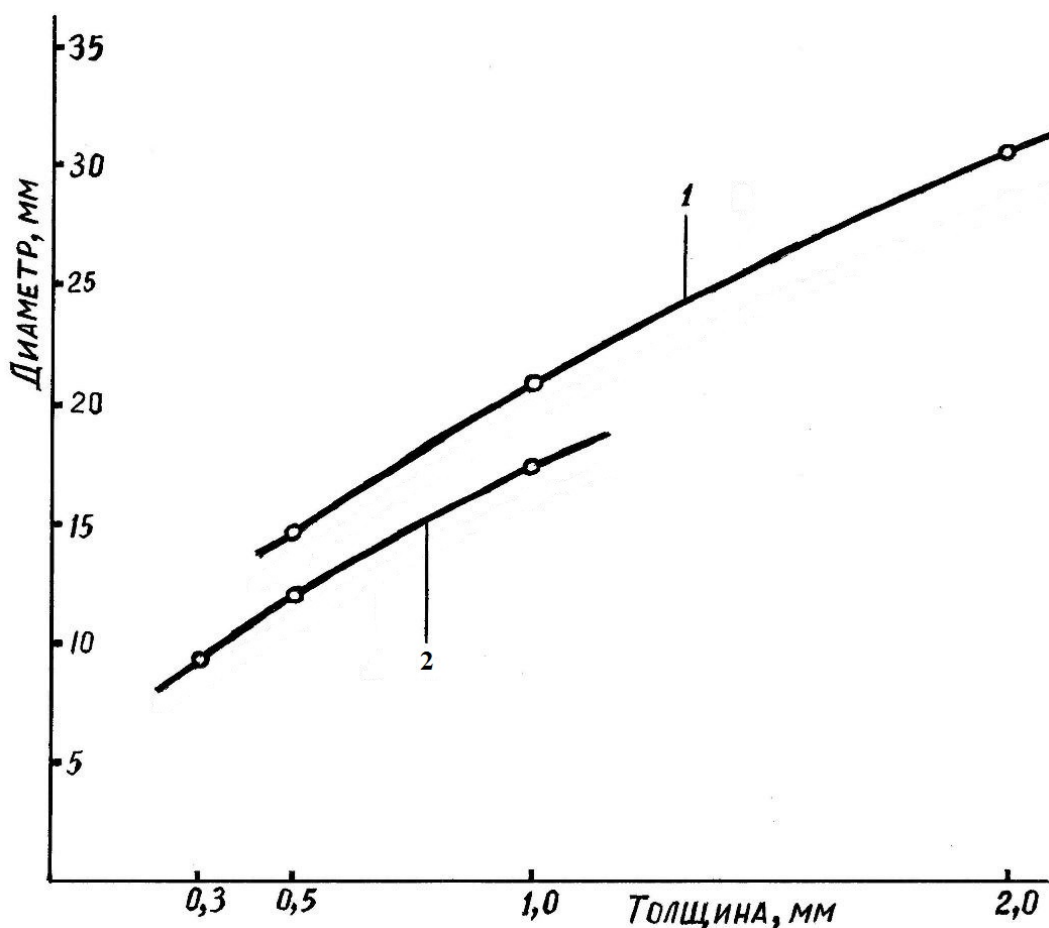


Рисунок 2 - номограммы для определения геометрических размеров биморфных пьезопреобразователей по линиям равной частоты.

1 – для преобразователей на 20 кГц, 2 – на 40 кГц.

В результате проведения работ были определены основные конструктивные параметры УЗ преобразователей на 20кГц и 40 кГц:

- размеры пьезоэлементов были выбраны 15мм по диаметру и 0,3мм по толщине для 20 кГц, 12мм диаметру и при толщине 0,25мм для 40 кГц; мембрана имеет диаметр 21,8мм при толщине 1мм для 20 кГц и 17,5 мм диаметр при толщине в 1 мм для 40 кГц;

- диаметр основания сферической части диафрагмы должен быть 21,8мм, ширина плоской части – 1,5-2,0мм, толщина алюминиевой плоско-сферической диафрагмы 0,1мм для 20 кГц и для 40 кГц диаметр основания сферической части – 17,5мм, ширина плоской части – 2мм, толщина алюминиевой плоско-сферической диафрагмы 0,15мм;

- радиус выпуклой части плоско-сферической диафрагмы, равный диаметру её основания обеспечивает необходимую жёсткость при минимальной толщине фольги при частотах 20кГц и 40 кГц.

2. Основные характеристики УЗ преобразователя

Особенностью данного типа ультразвуковых преобразователей является их невзаимозаменяемость для случаев приёма и излучения. Высокие значения электроакустических параметров, высокая эффективность преобразования сопровождаются увеличенным резонансным промежутком преобразователей. То есть разница между резонансными частотами в режимах, соответствующих работе на излучение и работе на приём гораздо больше, чем полоса пропускания. Так, резонансный промежуток исследуемых образцов составляет 1,1 – 1,3 кГц, в то время как полоса пропускания, определяемая механической добротностью преобразователя, имеет порядок 100 Гц. Этот факт диктует необходимость конструктивного отличия между приёмными и излучающими преобразователями. Это конструктивное отличие должно обеспечить равенство резонансной частоты излучателя антирезонансной частоте приёмника. В этом случае пара приёмник-излучатель будут работать согласованно, с максимальной акустической отдачей и чувствительностью.

Имеются две основные технические возможности уточнения конструкции ультразвукового преобразователя с целью его реализации как приёмника. Во-первых, можно сделать корректировку диаметра мембраны в сторону его увеличения при сохранении геометрии пьезоэлемента. Второй способ – изменить (уменьшить) диаметр пьезоэлемента. Первый способ предпочтителен, когда изготовитель использует покупные пьезоэлементы. Однако здесь имеется недостаток, заключающийся в том, что необходимо иметь два типоразмера мембран и два типоразмера диафрагм. Второй способ от этого недостатка свободен. Более того, уменьшение диаметра пьезоэлемента работает на повышение чувствительности, так как становится меньше статическая ёмкость.

Уточнение конструкции было произведено путём реализации второго способа. За основу был взят излучающий преобразователь с рекомендованными в предыдущем разделе геометрическими параметрами. Размеры приводного пьезопреобразователя: диаметр мембраны 22 мм, диаметр пьезоэле-

мента 15мм, толщина мембраны 1мм, толщина пьезоэлемента 0,3мм. При измерении частот получены следующие результаты. Резонансная частота – 20,2 кГц, антирезонансная частота 21,4кГц. Определение необходимого диаметра пьезоэлемента для приёмного преобразователя произвели экспериментально путём метода последовательных приближений. В итоге был изготовлен контрольный образец с диаметром пьезоэлемента 12мм. Его антирезонансная частота оказалась равной 20,24 кГц. Этот результат можно считать вполне удовлетворительным и дальнейшее уточнение нецелесообразно. Для резонансной частоты на 40 кГц был получен излучатель с частотой 39,7 кГц, а в паре с ним приёмник имел частоту 39,5 кГц.

По результатам всех испытаний этих образцов была составлена таблица.

Частота ультра- звука, кГц	Звуковое давление в точке приёма, дБ	Дальность действия, м		Напряжение на выходе преобр-ля, В	Относит. Чувстви- тельность, дБ
		Свободное распростран.	Ультразвук. локация		
20,2	120	82	29	0,88	-47
39,7	115	24	8	0,55	-53

При оценке технических характеристик ультразвуковых акустических приборов нельзя не учитывать влияние звукопоглощения в атмосфере. Ослабление звука при увеличении расстояния от источника происходит, не только благодаря распределению энергии в большем объёме из-за «геометрических» причин. Звуковые полны постепенно теряют свою энергию благодаря их поглощению. Если звуковая волна распространяется в неограниченной среде, то поглощение обусловлено, прежде всего, вязкостью воздуха, или, иначе, действием внутреннего трения, испытываемого частицами воздуха при их движении, вызываемом прохождением волны; при этом часть энергии звука превращается в тепло. Опытном установлено, что поглощение в большой степени зависит от частоты звука. Можно также теоретически показать, что потери энергии звуковой волны обратно пропорциональны квадрату длины волны и, следовательно, прямо пропорциональны квадрату частоты звука. При прохождении звуком чистого тона расстояния r начальное звуковое давление p_0 вследствие звукопоглощения атмосферой спадает по экспоненте. Звуковое давление $p(r)$ рассчитывают по формуле [4]:

$$p(r) = p_0 e^{-\alpha r}$$

где p – звуковое давление на расстоянии s , p_0 – начальное звуковое давление, α – коэффициент поглощения.

Для определения степени затухания за счёт поглощения в атмосфере необходимо знать величину коэффициента поглощения. Коэффициент поглощения звука зависит от относительной влажности и давления. В источнике [5] приведены зависимости коэффициента поглощения звука от влажности воздуха и частоты ультразвука, откуда заимствуем соответствующие графики. Они представлены на рисунке 3.

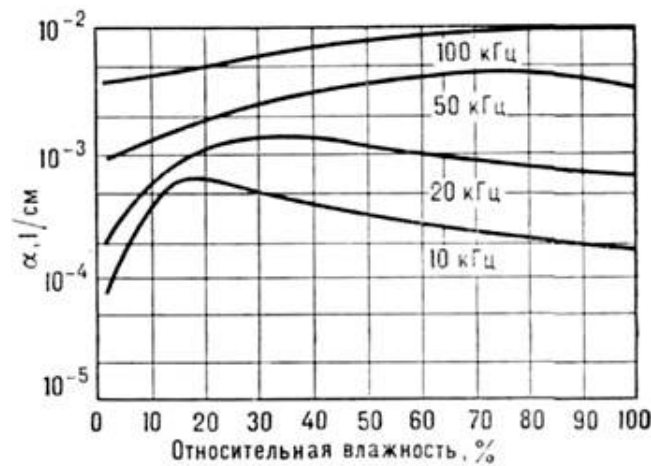


Рисунок 3 – зависимость коэффициента поглощения звука от относительной влажности воздуха и частоты

Пользуясь графиками и формулой, был осуществлён оценочный расчёт касательно дальности излучения и приёма ультразвука как для режимов свободного распространения, так и для случая приёма отражённого сигнала.

Полученные результаты говорят о том, что определяющую роль в дальности действия ультразвуковых преобразователей играет поглощение звука при распространении в атмосфере. Так, легко показать, что при отсутствии поглощения волн в атмосфере приём ультразвукового сигнала был бы возможен на расстоянии 100 км. Это подтверждается практикой передачи и приёма электромагнитного излучения, когда поглощение волн практически отсутствует. Если иметь цель обеспечить наибольшую дальность действия, то предпочтительно работать на частоте 20кГц, где поглощение меньше. Использование более чувствительного электронного приёмного устройства не приводит к существенной прибавке по дальности.

Необходимо отметить, что с увеличением дистанции уменьшается влияние на затухание ультразвука «геометрического» фактора, то есть расхождение луча и, напротив, становится определяющим влияние поглощения. Например, на частоте 40 кГц затухание на дистанции от пятого до шестого метра составит 1,59дБ, а между десятым и одиннадцатым 0,83 дБ. В то же время независимо от дистанции каждый метр распространения вносит затухание за счёт поглощения 3,5 дБ. Далее эта тенденция усиливается. Таким образом, чтобы увеличить дальность действия хотя бы на один метр нужно более чем удвоить интенсивность излучения или на 30% повысить чувствительность то ли приёмного преобразователя, то ли приёмного электронного устройства.

На основании проведённого исследования можно сделать вывод, что достигнутые результаты по электроакустическим параметрам ультразвуковых преобразователей с большей эффективностью можно реализовать в акустических устройствах на частотах ближнего ультразвука.

Результатом последних исследований явилось создание ещё одного конструктивного типа ультразвуковых преобразователей [7]. Их отличительной особенностью является использование в качестве излучающего и приёмного элементов кольцевой диафрагмы, заключённой между неподвижными периферийным и центральным элементами. Главным достоинством этого типа преобразователей является более узкая диаграмма направленности и ожидается, что дальнейшие исследования ультразвуковых преобразователей с кольцевой диафрагмой позволят получить дополнительное преимущество и по основным параметрам, т.е. по звуковому давлению и чувствительности.

Выполненные исследования представляют собой надёжную научно-техническую основу для дальнейших исследований, конструкторских и технологических разработок и создания серийноспособных образцов продукции.

Список использованных источников

1. Патент РФ на полезную модель №71496. 04 октября 2007г. «Электроакустический преобразователь».
2. ОСТ 11 0444-87, «Материалы пьезокерамические. Технические условия»
3. Гейер А.Ф. «Новые ультразвуковые преобразователи». Статья на сайте aerofon34.ru

4. ГОСТ 31295.1-2005. Шум. Затухание звука при распространении на местности.

5. Григорьев И.С. Физические величины. Справочник. Энергоатомиздат, 1991.

6. Земляков А.В. Отчёт по НИР « Исследование и оптимизация конструктивных параметров ультразвуковых пьезокерамических преобразователей с плоско-сферической диафрагмой» (программа «УМНИК»)

7. Патент РФ № 162340 на полезную модель. «Электроакустический преобразователь».