

## Воздушные ультразвуковые преобразователи. Новый пьезокерамический ультразвуковой преобразователь

**Гейер А.Ф.**

*Наиболее широкое техническое применение находят воздушные ультразвуковые преобразователи ближнего ультразвука, то есть преобразователи с частотой колебаний от 10 до 100 кГц. При этом наиболее предпочтительна частота – 40кГц, когда, с одной стороны, длина волны в воздухе достаточно мала с точки зрения разрешающей способности и эффективности электроакустического преобразования и, с другой стороны, затухание при распространении ультразвука ещё невелико.*

*При всём разнообразии типов, подтипов, типонаминалов, типоразмеров ультразвуковых преобразователей в основу конструктивного решения положены только два технических решения, отобранные практикой. Это так называемые преобразователи открытого и закрытого типа. Они отличаются взаимными преимуществами и недостатками. В преобразователе закрытого типа пьезоэлемент изолирован от окружающей среды и может применяться при наличии в воздухе пыли и агрессивных паров, но он имеет умеренные электроакустические параметры – звуковое давление, как излучателя и чувствительность, как приёмника. В преобразователе открытого типа пьезоэлемент имеет контакт с окружающей средой, но по электроакустическим характеристикам многократно превосходит преобразователи закрытого типа.*

*Возможно ли техническое решение, объединяющее только положительные качества, подобно идее персонажей анекдота родить ребёнка умного, как папа и красивого, как мама? Такое решение существует. Оно описано в статье «Пьезокерамические излучатели звука», на данном сайте. Как показано в настоящей работе, оно применимо и для ультразвукового диапазона.*

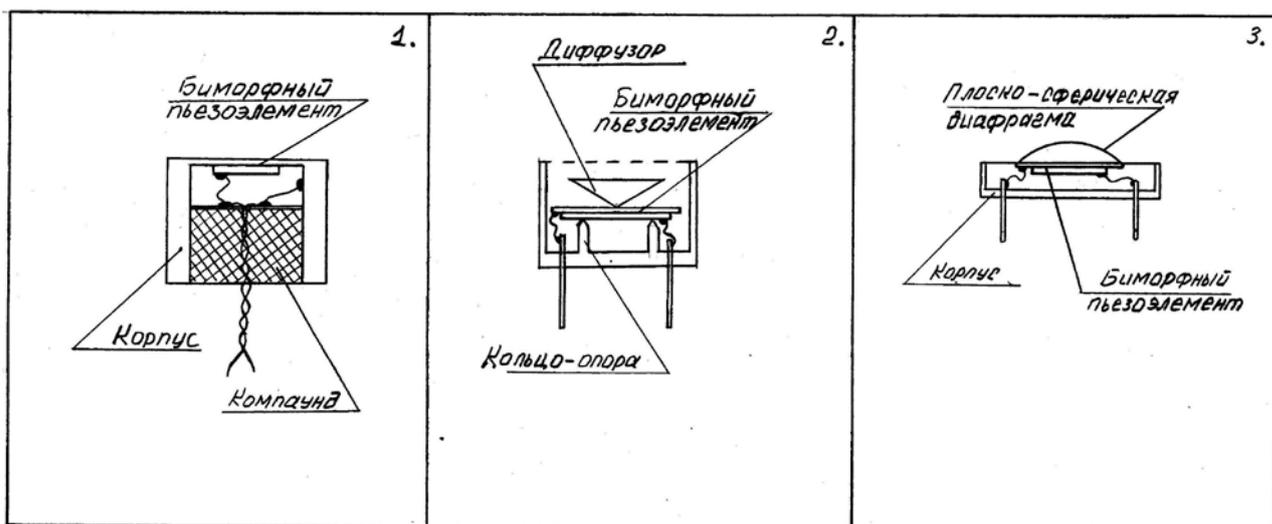
### **Три конструкции ультразвуковых преобразователей**

На рис.1 изображены в ряд три конструкции ультразвуковых преобразователей. Перейдём к описанию их особенностей.

На левом рисунке схематически изображён преобразователь закрытого типа. Это наиболее ранняя конструкция. Преобразователь представляет собой перевернутый стакан с тонким доньшком к которому с внутренней стороны приклеен тонкий пьезоэлемент. Доньшко выступает в роли мембраны и совместно с пьезоэлементом образует биморфную структуру – биморфный пьезоэлемент. При возбуждении переменным напряжением он совершает изгибные колебания и излучает в воздух ультразвуковые волны. Снизу по рисунку часть стакана заполнена герметиком, и этим обеспечивается изоляция пьезоэлемента от внешней среды.

На среднем рисунке изображён преобразователь открытого типа. Мембрана биморфного пьезоэлемента здесь не является частью корпуса. Он акустически с корпусом не связан и опирается на кольцо, которое по диаметру совпадает с так называемой узловой окружностью, то есть с окружностью нулевого смещения. Максимумы амплитуды колебаний находятся в центре и на периферии биморфа, а узловая окружность является границей раздела фаз колебаний. В центре биморфного пьезоэлемента крепится конусный лёгкий жёсткий диффузор, который, будучи связан с точкой максимальной амплитуды, эффективно излучает ультразвук всей своей поверхностью. Диффузор должен быть существенно легче, чем масса биморфа, его привода. В противном случае из-за массовой нагрузки понизится его частота и уменьшится амплитуда колебаний. Обычно

функциональную часть преобразователя защищают сеткой, которая не задерживает звук, но также и не защищает от пыли влаги и агрессивных примесей.



**Рис.1. Конструкции ультразвуковых преобразователей: закрытого типа (1), открытого типа (2) и конструкция с плоско-сферической диафрагмой (3).**

Почему открытый преобразователь имеет лучшие электроакустические параметры? Почему он излучает более эффективно? Или же почему закрытый преобразователь менее эффективен? Чтобы это понять воспользуемся следующим приёмом. Пошагово перейдём от открытой конструкции к закрытой и проследим, что при этом теряем. Первый шаг: обрежем периферийную часть биморфного пьезоэлемента, выступающую за пределы опорного кольца. Но при этом, чтобы сохранить неподвижность опоры, делаем второй шаг: увеличиваем массу опоры, превращая её в упомянутый стакан. В пределе масса должна быть бесконечной, но обычно боковые стенки стакана раз в десять тяжелее доньшка, то есть биморфного пьезоэлемента. При этом мы жертвуем амплитудой колебаний, так как часть механической энергии тратится на вибрацию стакана и, в конечном счёте, на тепло. Шаг третий: убираем конусный диффузор. Тем самым мы сокращаем эффективную излучающую поверхность и, соответственно, громкость ультразвука.

На правом рисунке изображена конструкция ультразвукового преобразователя с плоско-сферической диафрагмой. Как видим, биморфный пьезоэлемент, как и на левом рисунке, изолирован от внешней среды. Теперь покажем, почему от этого преобразователя следует ожидать такой же или большей эффективности, чем у открытого. Воспользуемся тем же приёмом – пошагово перейдём от среднего рисунка к правому. Первым шагом перевернём конусный диффузор, заменив крепление в одной, центральной точке креплением основания к периферии биморфного пьезоэлемента. Заодно придадим этому элементу сферическую форму, как наиболее прочную. Результат этого шага акустически эквивалентен исходному состоянию. Просто мы поменяли местами привод и противовес. Приводом для колебательного движения сферического элемента стала периферийная часть пьезоэлемента, а противовесом центральная. Вторым шагом исключим поддерживающее кольцо и добавим к сферическому элементу горизонтальную часть, прикрепив её к корпусу. Так как сферическая часть полученной плоско-сферической диафрагмы относительно лёгкая, то характер колебаний биморфного пьезоэлемента практически не изменится, а эффективная излучающая поверхность станет больше. Более того, отсутствие крепления к опорному кольцу, которое выполняется

посредством клея, даёт дополнительный выигрыш в виде более высокой добротности и, соответственно, в амплитуде колебаний.

Как было отмечено, диффузор в преобразователе открытого типа и плоско-сферическая диафрагма должны быть существенно меньше по массе чем биморфный пьезоэлемент, их привод. Ввиду того, что эти элементы не являются невесомыми, обсудим их влияние и покажем дополнительную роль плоской кольцевой части диафрагмы. Рассуждения по этому вопросу будут более понятны, если рассмотреть на рис.2 фотоизображения поверхности биморфного пьезоэлемента. На левом изображении показано исходное состояние биморфа с насыпанным на его поверхность песком.



***Рис.2. Изображения узловых окружностей биморфного пьезоэлемента. Слева направо: исходное состояние, ненагруженный пьезоэлемент, пьезоэлемент с прикрепленной в центре массой на оборотной стороне.***

При подаче на пьезоэлемент переменного напряжения возбудим его колебания. Песчинки начнут подпрыгивать и, в конечном итоге, соберутся там, где колебания отсутствуют, то есть на узловой окружности. Это видно на среднем изображении. На правом изображении пьезоэлемент имеет массовую нагрузку, закреплённую в центре, с оборотной стороны. При этом диаметр узловой окружности стал меньше, чем у свободного пьезоэлемента. Если пьезоэлемент нагрузить по периферии массой сферического элемента, то диаметр узловой окружности станет больше. Масса «притягивает» узловую линию к себе. При этом понижается частота колебаний, уменьшается амплитуда в месте крепления массы и увеличивается амплитуда колебаний противовесной части, по другую сторону от узловой линии. Поэтому, как конусный диффузор, так и сферическая часть плоско-сферической диафрагмы должны быть как можно более невесомыми и как можно менее деформируемыми. Что касается смещения частоты, то в преобразователе открытого типа делается поправка на это смещение от заданной величины. Размеры биморфного пьезоэлемента подбираются такими, чтобы его частота в свободном состоянии была выше на величину понижения за счёт массы диффузора. Особенностью и преимуществом преобразователя с плоско-сферической диафрагмой является то, что массовую нагрузку на пьезоэлемент можно скомпенсировать плоской кольцевой частью, подбирая ширину кольца. Ведь плоско-сферическую диафрагму можно рассматривать как колебательную систему с сосредоточенными параметрами, где недеформируемая сфера – это масса, а плоское кольцо – это пружина. Варьируя диаметр наружной границы кольца легко добиться того, что частота системы будет равна частоте биморфного пьезоэлемента в его свободном состоянии и диаметр узловой окружности также будет равен диаметру для свободного состояния. Подобрав, таким образом, внешний диаметр диафрагмы мы не потеряем в амплитуде, и также не потребуются предварительная поправка на частоту.

## **Обратимы ли ультразвуковые преобразователи?**

Общепринято считать, что ультразвуковые преобразователи и любые другие пьезопреобразователи, как и сам пьезоэффект, являются обратимыми. В данном случае обратимость мы понимаем в следующем смысле. Два одинаковые преобразователя, из которых один излучает сигнал, а другой принимает, можно поменять местами и при этом ничего не изменится. Сделаем эксперимент, который покажет, что это в обычной практике невозможно, а если возможно, то в результате некоторого компромисса.

Подключим ультразвуковой преобразователь к генератору сигналов и направим излучение на конденсаторный микрофон, сигнал с которого подадим на усилитель. Перестраивая частоту, добьёмся максимального сигнала и запомним эту частоту. Затем этот же преобразователь подключим к осциллографу или вольтметру и, уже в режиме приёма, определим частоту максимальной чувствительности. Эта частота уже будет другая. Она на 5 - 10% выше той, которая была в режиме излучения. Разница в частотах приёма и излучения зависит от типа преобразователя. Так, эта разница для закрытых преобразователей на номинальную частоту 40кГц составляет, примерно, 2кГц. Для преобразователей открытого типа до 3,5 – 4кГц. Ввиду сравнительно малой разницы в частотах приёма и излучения закрытые преобразователи используются как приёмопередатчики. Их полосы частот удовлетворительно перекрываются. Здесь как раз оправданно идти на компромисс, работая в промежутке между частотами, которые, по отдельности, предпочтительны либо для приёма, либо для излучения. Открытые же преобразователи работают либо как приёмники, либо как излучатели.

Почему один и тот же преобразователь имеет разные резонансные частоты при приёме и излучении? Пожалуй, проще всего это объяснить исходя из незыблемости закона сохранения энергии. Прикладывая силу к пьезоэлементу, мы его не только деформируем, но и создаём на электродах заряды и разность потенциалов. Создаём электрическое поле, которое обладает энергией. Если электрическое поле не создавать, а это сделать очень просто, закоротив электроды, то потребуется меньшее усилие для той же деформации. Здесь не нужно затрачивать дополнительную работу на создание электрического поля с его энергией. Поэтому пьезоэлемент с закороченными электродами более податлив. Пьезоэлементам с закороченными и незакороченными электродами соответствуют разные значения упругой жёсткости. Во втором случае она больше и, следовательно, частота выше. Ведь резонансная частота пропорциональна корню квадратному из упругой жёсткости. Таким образом, любой резонансный пьезопреобразователь имеет две резонансные частоты, которые соответствуют двум состояниям: электроды закорочены и электроды не закорочены. Казалось бы, какое отношение имеют эти два состояния, эти два режима к практике использования ультразвуковых преобразователей? - Самое непосредственное. Подключая преобразователь к генератору, тем самым задаём режим с закороченными электродами, так как выходное сопротивление генератора мало по сравнению с сопротивлением преобразователя на резонансе. Напротив, когда подключаем преобразователь ко входу осциллографа, вольтметра или усилителя реализуется режим с раскороченными электродами ввиду большого входного сопротивления этих устройств. Так внешние цепи диктуют преобразователю на какой из двух частот ему колебаться и вынуждают делать преобразователи двух исполнений.

### ***Что влияет на эффективность ультразвукового преобразователя?***

Резонансные частоты, соответствующие этим двум состояниям можно определить не прибегая к упомянутому ранее сложному эксперименту. Эти частоты можно определить, измеряя напряжение на малом сопротивлении, соединив его последовательно с преобразователем, по минимуму и максимуму импедансов преобразователя. Эти частоты

называются, соответственно резонансной и антирезонансной частотами. Их разность называется резонансным промежутком. Величина резонансного промежутка является показателем эффективности преобразования механической энергии в электрическую или наоборот. Ведь разница в частотах всецело зависит от разницы упругой жёсткости, а эта разница предопределяет работу на создание электрического заряда на электродах.

Преобразующим элементом ультразвукового преобразователя является биморфный пьезоэлемент, причём второй частью биморфа обычно является металлическая мембрана. Мембрана, естественно, никакими пьезоэлектрическими свойствами не обладает и, являясь частью единого колебательного элемента, маскирует различие упругой жёсткости для состояний с закороченными и раскороченными электродами, уменьшает резонансный промежуток. Чем меньше доля пьезоэлектрического вещества в общей массе преобразователя, тем меньше резонансный промежуток, лучше его «обратимость», но и тем хуже эффективность электромеханического преобразования.

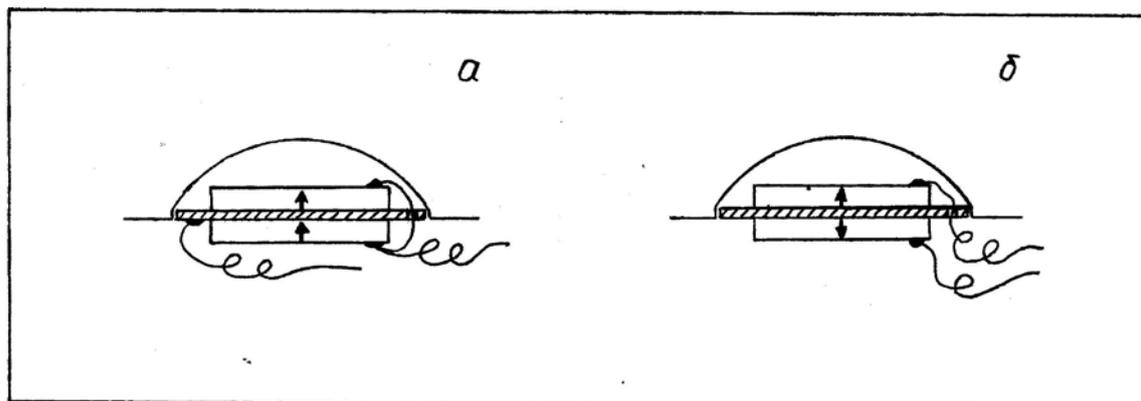
Обеспечение наибольшего значения резонансного промежутка ультразвукового преобразователя является необходимым, но явно недостаточным условием для эффективного излучения или приёма ультразвуковых волн. Если кусок арматуры погружать вертикально в воду, то, как бы мы ни старались, особого волнения не вызовем. Другое дело погружать прутки горизонтально, шлёпая. Провода энергосистем не излучают электромагнитные волны, так как длина волны для частоты 50Гц составляет 6000км. Для эффективного излучения или приёма ультразвуковых волн необходимо, чтобы излучающая поверхность имела достаточно большой размер, не менее порядка длины волны. Для ультразвука частотой 40кГц этот размер должен быть хотя бы 8мм.

### *Усиливаем необратимость ультразвуковых преобразователей*

Вернёмся к вопросу о конструкции биморфного пьезоэлемента. Как отмечалось, биморфный пьезоэлемент ультразвукового преобразователя состоит из активного и пассивного (металлическая мембрана) элементов, которые имеют примерно равную толщину. Мембрана может быть и толще пьезоэлемента, что характерно для закрытых преобразователей. При тонкой по отношению к пьезоэлементу мембране менее выражен изгибный эффект, как основное функциональное свойство ультразвукового преобразователя. Более сильный изгибный эффект имеет место у биморфа, состоящего из двух активных элементов, пьезоэлементы такой биморфной пластины электрически коммутированы таким образом, чтобы их деформация по плоскости была разного знака. Такую биморфную пластину удобно и целесообразно выполнить с мембраной-прокладкой, но уже меньшей толщины. Применение такого, более эффективного, биморфного пьезоэлемента напрашивается именно в ультразвуковом преобразователе с плоско-сферической диафрагмой. При этом улучшаются его электроакустические характеристики и сохраняется изолированность пьезоэлементов от внешней среды. Можно пойти и дальше. Коль скоро, в силу частотной разницы для излучения и приёма, эти преобразователи всё равно должны быть отдельных исполнений, то целесообразно усилить их различие и по другим признакам. Поэтому коммутацию элементов биморфа сделаем разную. Для преобразователей излучающего назначения целесообразно электрически параллельное соединение пьезоэлементов, составляющих биморф. Для преобразователей, предназначенных для приёма ультразвука, пьезоэлементы соединим последовательно. Это удвоит чувствительность.

На рис.3 представлены конструкции биморфных пьезоэлементов для излучающего преобразователя (а) и приёмного преобразователя (б). Стрелками показано направление поляризации пьезоэлементов. Соблюдение полярности важно для обеспечения изгибной деформации. Мембрана имеет небольшое отверстие, чтобы, во-первых, вывести провод из-под колпака, во-вторых, для выравнивания атмосферного давления по обе стороны биморфа. Описанная процедура, наряду с улучшением акустических характеристик,

исключает какой бы то ни было компромисс и окончательно закрепляет за одним исполнением статус излучателя, а за другим – приёмника.



### Опытные образцы

В результате экспериментов было определено, в своей основе, конструктивное построение ультразвуковых преобразователей с плоско-сферической диафрагмой. О форме преобразователей в достаточной мере говорилось выше. Здесь приведём размеры, имеющие определяющее значение для реализации основных электроакустических параметров, применительно к двум частотным исполнениям, на 20кГц и 40кГц. Это касается, прежде всего, размеров пьезокерамических дисков для биморфного элемента и размеров диафрагмы. Эти размеры приведены в таблице 1.

Таблица 1.

	Размеры в мм для исполнений:	
	20кГц	40кГц
Диаметр пьезокерамического диска	10	8
Толщина пьезокерамического диска	0,3	0,3
Диаметр мембраны	14	11,3
Толщина мембраны	0,25	0,25
Диаметр основания сферической части диафрагмы	14	11,3
Внешний диаметр диафрагмы	17,5	14
Радиус сферы сферической части	15	12
Толщина диафрагмы	0,1	0,1

Конфигурация и размеры остальной части преобразователей определяются их конкретным применением, способом установки и на акустические характеристики не

вливают. Минимальный габарит по высоте определяется высотой сферической части диафрагмы (1,5 – 2,5мм), толщиной биморфа и нижней крышки, то есть может составить 4-5 мм. На рис.4 показаны фотографии опытных образцов для исполнений 20кГц (слева) и 40кГц (справа).



**Рис. 4. Опытные образцы ультразвуковых преобразователей с плоско-сферической диафрагмой. Слева – частотное исполнение 20кГц, справа – частотное исполнение – 40кГц.**

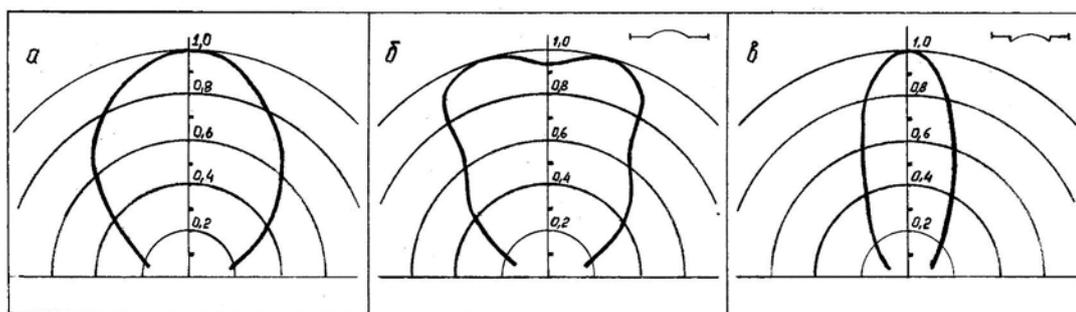
Далее, в таблице 2, приведём электрические и акустические параметры преобразователей.

Таблица 2

Параметры	Измеренная величина для исполнений:			
	20кГц		40кГц	
	Излуч.	Приёмн.	Излуч.	Приёмн.
Звуковое давление на расстоянии 30см при напряжении сигнала 20В, дБ	124	-	122	-
Чувствительность, дБ	-	-42	-	-45
Резонансная частота, кГц	20	18,2	40	36
Антирезонансная частота, кГц	21,7	20	44	40
Полоса частот по уровню 3дБ, кГц	0,8	0,8	1,7	1,7
Электрическая ёмкость, нФ	8	2	5	1,2

Особое внимание уделим результатам исследования диаграммы направленности преобразователей. Выпускаемые в настоящее время ультразвуковые преобразователи имеют диаграмму направленности овальной формы. Поэтому, для получения представления о диаграмме достаточно указать лишь угол, где звуковое давление или чувствительность снизились до условленного уровня, например на 3дБ. В исследуемых же образцах, ввиду увеличенного размера излучающей поверхности ( он достигает до двух

длин волн или четырёх полуволн), и её неплоской формы, следует ожидать более сложную интерференционную картину. Центральная часть диафрагмы возвышается над плоской частью на расстояние, составляющее 18 – 20% от длины волны. Стало быть, излучение от сферической части идёт с опережением фазы до  $60^\circ$  и по оси излучения должен наблюдаться провал. Это и было зафиксировано при измерениях. На рис.5 приведены диаграммы направленности для трёх вариантов излучающих поверхностей. Диаграммы представлены в линейном масштабе в нормированном виде. В данном случае это более удобно для сравнения. На рис. 5а показана диаграмма направленности обычного открытого ультразвукового преобразователя. На рис. 5б изображена диаграмма преобразователя с плоско-сферической диафрагмой. Её форма уже не овальная а, скорее,



**Рис.5. Диаграммы направленности воздушных ультразвуковых преобразователей: а) типичная диаграмма направленности преобразователя открытого типа; б) диаграмма направленности преобразователя с плоско-сферической диафрагмой; в) диаграмма преобразователя с приподнятой плоской частью диафрагмы.**

бабочкообразная. Основная доля мощности излучения заключена в телесном угле  $60 - 65^\circ$  с небольшим провалом по оси. За пределами этого угла звуковое давление или чувствительность резко падает, образуя далее, на фоне монотонного снижения, второй интерференционный минимум. Далее была предпринята попытка выравнять фазовое распределение колебаний по излучающей поверхности. Для этого плоско-сферическая диафрагма была выполнена с возвышением плоской части относительно уровня основания сферического колпачка (форма диафрагмы показана в верхней части рисунков). В этом случае диаграмма направленности приняла вид, изображённый на рисунке 5в. Диаграмма вновь стала овальной, но направленность существенно увеличилась.

### ***В чём преимущество третьей конструкции?***

Ультразвуковые воздушные преобразователи широко применяются для измерения расстояний до объекта, способного отражать ультразвук, для бесконтактного обнаружения присутствия неподвижных или движущихся объектов. В этой области применений преобразователи с плоско-сферической диафрагмой могут иметь преимущество в увеличении дальности обнаружения. Дальность обнаружения может быть в 2-4 раза больше, чем у обычных открытых преобразователей, при этом обеспечивается степень защиты, характерная для преобразователей закрытого типа. Дальнейшие исследования в этой части должны быть направлены на повышение производственной технологичности конструкции или, иными словами, на обеспечение коммерциализуемости. Эта задача может быть решена пластмассовым исполнением диафрагмы и корпуса путём литья. В случае получения надлежащих характеристик этот способ обеспечит минимальные затраты на изготовление.

Второе преимущество заключается в том, что преобразователи с плоско-сферической диафрагмой могут получить применение в новой области, а именно в

бесконтактной локализации объекта в пространстве. Измерения диаграммы направленности показали, что вариация формы излучающей поверхности служит инструментом для получения диаграмм направленности различных форм в довольно широких пределах. Так, изменяя высоту сферической части над плоской можно, например, получить следующие варианты диаграммы:

- 1) практически равномерное звуковое давление или чувствительность в довольно широком телесном угле,  $50-70^\circ$ , и резкое падение вне этого угла. Это предотвратит ложное срабатывание системы от объекта, находящегося вне контролируемой зоны;
- 2) широкоугольная диаграмма с усиленным провалом в центре. Такая диаграмма предпочтительна для локализации в пространстве одиночного неподвижного объекта или одиночно движущегося среди множества неподвижных;
- 3) узконаправленная диаграмма для локализации неподвижного или движущегося объекта среди других в пределах своей разрешающей способности.

Вероятно, возможна комбинация этих вариантов. Вообще, получение диаграммы направленности специальной формы представляет собой предмет отдельного исследования.

**Декабрь, 2010г.**