

## **Акустические пьезоэлектрические преобразователи для многолучевых ультразвуковых расходомеров газа**

О. М. Богуш, Д.Г. Макаров, Э.М. Пикалев, С.А. Толмачев

ООО «Пьезоэлектрик», Ростов-на-Дону, Россия

Принцип действия ультразвукового расходомера газа основан на время-импульсном методе измерения [1]: измеряется время прохождения ультразвукового (УЗ) сигнала, распространяющегося под углом к направлению газового потока. Разность времен распространения сигнала, направленного по потоку и против потока позволяет определить среднюю скорость потока и, следовательно, вычислить его расход.

Важным требованием газовой расходомерии является повышение точности измерения расхода газа. Это, в частности, достигается применением многолучевых расходомеров с параллельными или скрещенными лучами ультразвука [2, 3]. Поскольку скорость потока газа не постоянна по сечению трубопровода, многолучевые схемы измерения позволяют достичь значительно большей точности измерения расхода по сравнению с однолучевыми. Каждый из УЗ лучей осуществляется парой идентичных пьезоэлектрических преобразователей (ПП), которые поочередно работают в режимах излучения и приема УЗ сигнала.

При разработке ПП для многолучевых расходомеров важной проблемой является миниатюризация ПП: для обеспечения размещения 2 – 4 датчиков в одном ряду на узле трубопровода размеры датчика должны быть по возможности малыми. Уменьшение размеров ПП связано с повышением рабочей частоты и снижением чувствительности, т.е., коэффициента преобразования  $K_{vv}$  – отношения амплитуды выходного сигнала на приемнике к амплитуде входного сигнала на излучателе.

Кроме того, разработка ПП предполагает решение проблем устойчивости ПП к высоким давлениям, расширения температурного

рабочего диапазона, повышения помехоустойчивости, расширения динамического диапазона измерений.

Типичная конструкция акустического ПП для газовых расходомеров показана на рис. 1. Преобразователь содержит металлический корпус, имеющий цилиндрическую полость с замыкающей стенкой (мембраной) на одном конце и открытую на противоположном конце, в которой соосно полости последовательно от мембраны размещены протектор, пьезоэлемент, опорное кольцо и ниппель с отверстием, а также проводники, соединяющие электроды пьезоэлемента с сигнальным кабелем или разъемом. Мембрана может быть сделана за одно целое с корпусом или соединена с ним по контуру сваркой. Пьезоэлемент соединен с мембраной через протектор из материала с низким акустическим сопротивлением, изготовленного на основе эпоксидной смолы с наполнителем из порошка полых стеклосфер. При этом оптимальные размеры пьезоэлемента, протектора, корпуса, опоры подбираются путем моделирования устройства методом конечных элементов [1,4] таким образом, чтобы на рабочей частоте, приблизительно соответствующей радиальному резонансу пьезоэлемента, на поверхности мембраны возбуждались колебания осевого направления, передающие акустическую волну в газовую среду.

Проектирование ПП осуществляется с применением метода конечных элементов, позволяющего исследовать преобразователь как единое неоднородное электроупругое тело со сложной геометрией.

Основная роль в процессе преобразования электрической энергии в звуковую и обратно принадлежит пакету пьезоэлемент - протектор. При подаче на свободный пьезоэлектрический диск гармонического электрического сигнала пьезоэлемент наиболее эффективно возбуждается на частоте радиального резонанса  $f_r$ . Эта частота в основном определяется радиусом пьезоэлектрического диска. Для тонких пьезоэлементов (толщина диска мала по сравнению с его радиусом) частота  $f_r$  обратно пропорциональна радиусу и практически не зависит от толщины диска,

однако при толщине, сравнимой с радиусом, частота  $f_r$  существенно отклоняется от обратной пропорциональности в сторону понижения частоты.

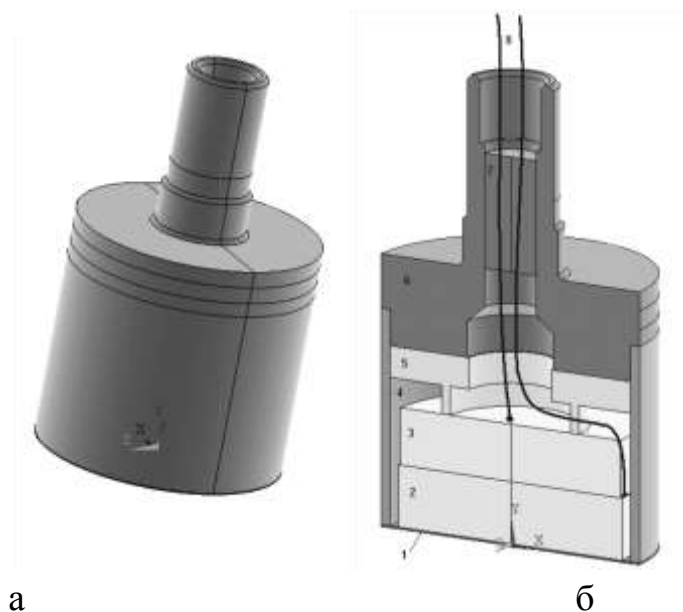


Рис. 1. Внешний вид (а) и конструкция преобразователя (б): 1 – мембрана; 2 – протектор; 3 – пьезоэлемент; 4 – гильза; 5 – втулка с опорным кольцом; 6 – основание; 7 – пробка; 8 – проводники.

Протектор – диск того же радиуса, изготовленный из материала с малым акустическим импедансом для наилучшего согласования с газовой средой. В протекторе, жестко связанном с пьезоэлементом, происходит преобразование радиальных колебаний пьезоэлемента в осевые колебания свободной поверхности протектора, которая, таким образом, становится излучателем акустического сигнала в среду, контактирующую с этой поверхностью. Толщину протектора следует подобрать таким образом, чтобы амплитуда средних смещений излучающей поверхности на рабочей частоте была максимальной. Протектор при этом совершает сложное колебательное движение, включающее в себя как радиальные, так и осевые смещения. Поэтому определить его оптимальную толщину с помощью аналитических вычислений не представляется возможным. Однако, моделирование и исследование пакета с помощью метода конечных элементов позволяет путем варьирования размеров найти оптимальный вариант.

Аналитический расчет для предельного случая слоистой системы с тонкими слоями (толщина слоя намного меньше диаметра пакета) дает, как известно [5], величину  $\lambda/4$  в качестве оптимальной толщины согласующего слоя – протектора ( $\lambda$  – длина продольной волны в материале протектора). Однако, когда толщина слоя соизмерима с диаметром пакета, величина  $\lambda/4$  может служить лишь грубой оценкой толщины протектора, а действительная его оптимальная толщина должна определяться расчетами конечно-элементной модели преобразователя.

Важными деталями преобразователя, играющими существенную роль в формировании акустического сигнала, являются мембрана и гильза. Они образуют металлическую цилиндрическую полость, в которой размещается пакет пьезоэлемент-протектор. В процессе сборки преобразователя пакет вставляется в полость гильзы соосно ей, поджимается основанием к мембране, и гильза соединяется сварным швом с основанием в таком механически напряженном состоянии, что обеспечивает сохранение механического контакта между протектором и мембраной после снятия внешних прижимающих сил. Мембрана выполнена из металлического листа малой толщины (0,2 мм), и в процессе возбуждения звуковых колебаний передает их в контролируемую газовую среду, а в режиме приема передает колебания давления газовой среды на протектор и далее на пьезоэлемент. Благодаря малой толщине мембраны, она не вносит больших изменений в согласование акустических импедансов протектора и газовой среды, но в то же время обеспечивает герметичность преобразователя относительно контролируемой среды и охраняет поверхность протектора от ее разрушительных воздействий.

Исследование модели ПП методом конечных элементов позволяет подобрать геометрические размеры деталей ПП таким образом, чтобы в излучателе наиболее эффективно осуществлялось преобразование электрического сигнала в акустический, а в приемнике – обратное преобразование. При этом в колебательных процессах участвует вся

совокупность деталей. Метод конечных элементов дает возможность визуализировать характер колебаний ПП и выбирать наиболее эффективный режим его работы, рис. 2. Далее, проводится исследование частотных характеристик конечно-элементных моделей. При этом:

1) рассчитываются частотные характеристики проводимости преобразователя, что позволяет непосредственно сопоставить расчетные данные с экспериментом и внести необходимые коррективы в модель;

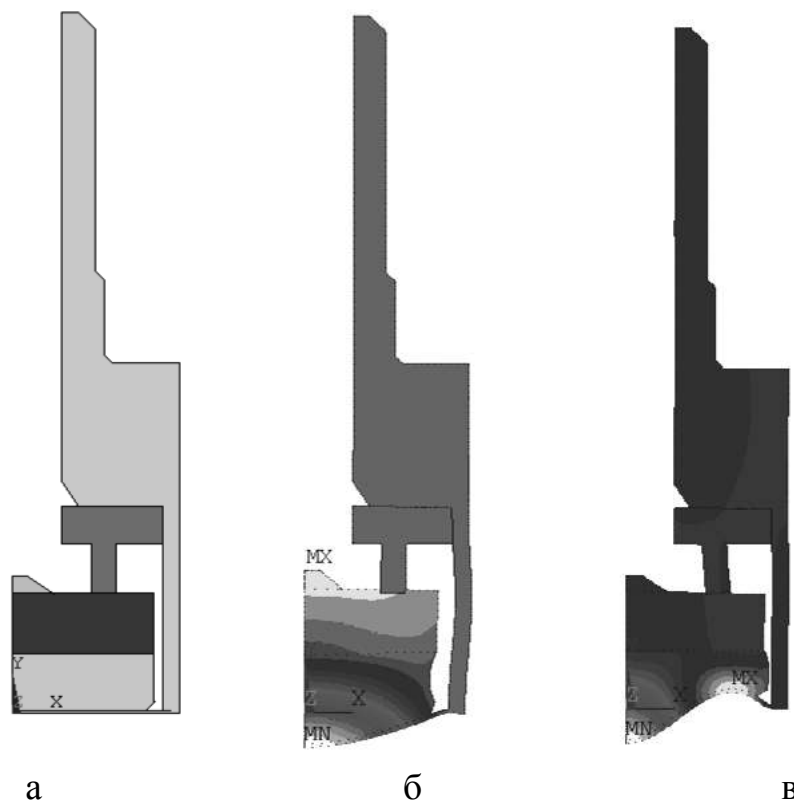


Рис. 2. Геометрическая модель преобразователя (а) и характер его колебаний на рабочей моде (б) и на одной из собственных мод с менее эффективным излучением (в).

2) рассчитывается частотная характеристика излучателя  $U_{cp}(f)$ , где  $U_{cp}$  – среднее смещение мембраны излучающего преобразователя в осевом направлении при подаче на его электроды гармонического напряжения единичной амплитуды;

3) рассчитывается частотная характеристика приемника  $V(f)$ , где  $V$  – амплитуда напряжения на электродах приемника при действии на его мембрану гармонического давления единичной амплитуды;

4) вычисляется частотная характеристика результирующего коэффициента преобразования  $K_{vv}(f)$  как произведение двух частотных характеристик

$$K_{vv}(f) = B \cdot U_{cp}(f) \cdot V(f) \cdot f^2,$$

где  $B$  – некоторый нормирующий коэффициент, зависящий от диаметра мембраны  $D$ , расстояния между мембранами излучателя и приемника  $L$  и плотности газа  $\rho$ :  $B = \pi^2 D^2 \rho / L$ . Коэффициент преобразования рассчитывается для стандартного расстояния  $L = 300$  мм.

Этапы 2 – 4 иллюстрируются примером частотных характеристик на рис. 3.

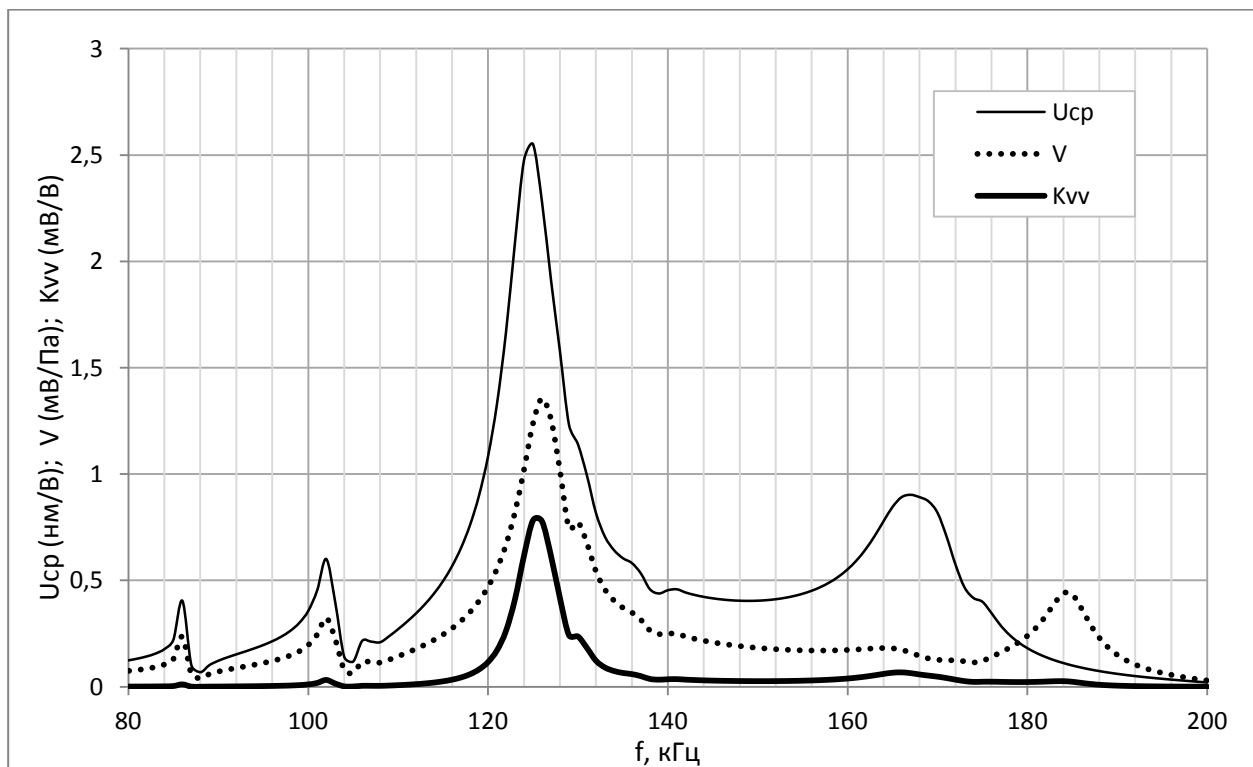


Рис. 3. Иллюстрация метода исследования частотных характеристик: расчетные характеристики излучения  $U_{cp}(f)$ , приема  $V(f)$  и вычисленная на их основе характеристика результирующего коэффициента преобразования  $K_{vv}(f)$ .

Для достижения поставленной цели подбирается совокупность размеров преобразователя, при которых частотная характеристика  $K_{vv}(f)$  имеет вид уединенного доминирующего пика с достаточно высоким максимальным значением. Проводимые нами в течение ряда лет разработки и исследования акустических ПП позволяют представить некоторую сводку результатов в

виде диаграмм, рис. 4, отражающих корреляцию между размерами ПП (диаметром датчика  $D$ ), рабочими частотами  $f$  и коэффициентами преобразования  $K_{vv}$ . Как отмечалось выше, уменьшение размеров связано с ростом рабочей частоты и снижением коэффициента преобразования  $K_{vv}$ .

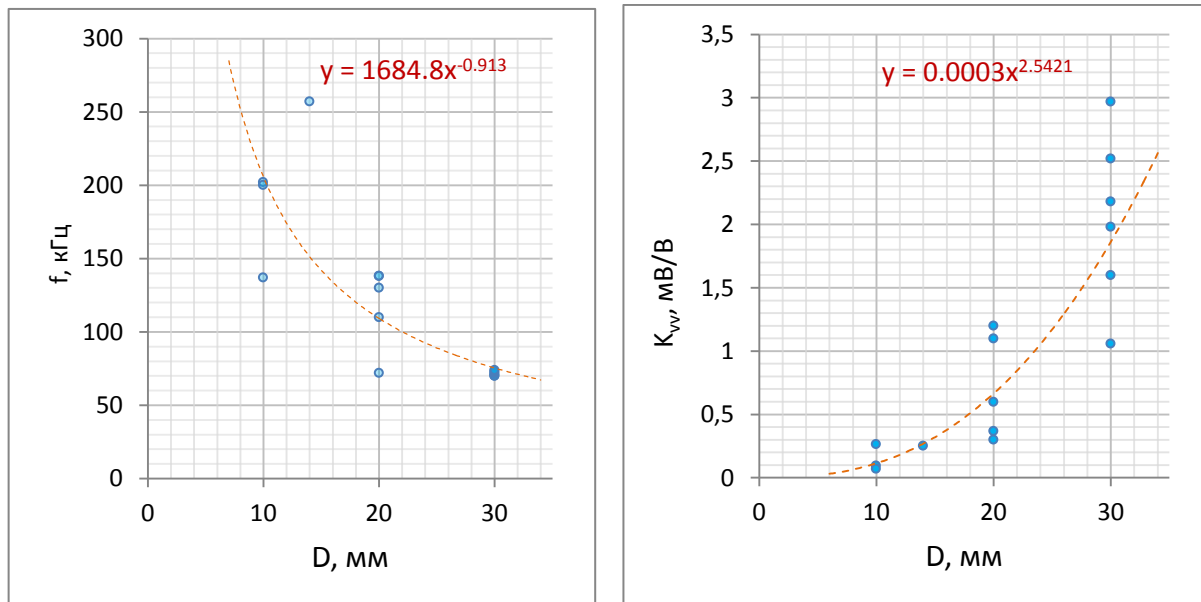


Рис. 4. Корреляция между диаметром ПП, рабочей частотой  $f$  и коэффициентом преобразования  $K_{vv}$  для различных моделей преобразователей. Показаны линии тренда, аппроксимируемые степенными функциями.

На пути миниатюризации ПП разработана модель преобразователя с внешним диаметром гильзы 14 мм и диаметром пьезоэлемента 8.2 мм, имеющего рабочую частоту 260 кГц и коэффициент преобразования 0.26 мВ/В. На основе этой модели изготавливаются пьезопреобразователи ПП-228, характеристики которых близки к расчетным. Эти ПП успешно используются на предприятии «Турбулентность». Рассчитана также модель датчика с внешним диаметром гильзы 10 мм и диаметром пьезоэлемента 6.8 мм, имеющего рабочую частоту 200 кГц и коэффициент преобразования 0.26 мВ/В.

Для расчета импульсных характеристик строится модель двух идентичных встречно направленных ПП, разделенных газовой средой. На рис. 6а показана половина осевого разреза такой модели. Газ заполняет объем

полусферы с центром на мембране излучателя. На сферической поверхности задается граничное условие единичного импеданса, благодаря чему акустические волны проходят эту поверхность без отражения, что имитирует бесконечную газовую среду. В момент времени  $t = 0$  на электроды излучателя подается прямоугольный импульс напряжения единичной амплитуды, длительность которого равна половине периода рабочей частоты. Когда акустические волны, возбужденные этим импульсом, достигают мембраны приемника, они вызывают в нем электрический сигнал, по которому регистрируется время прохождения импульса, рис. 6 б, в.

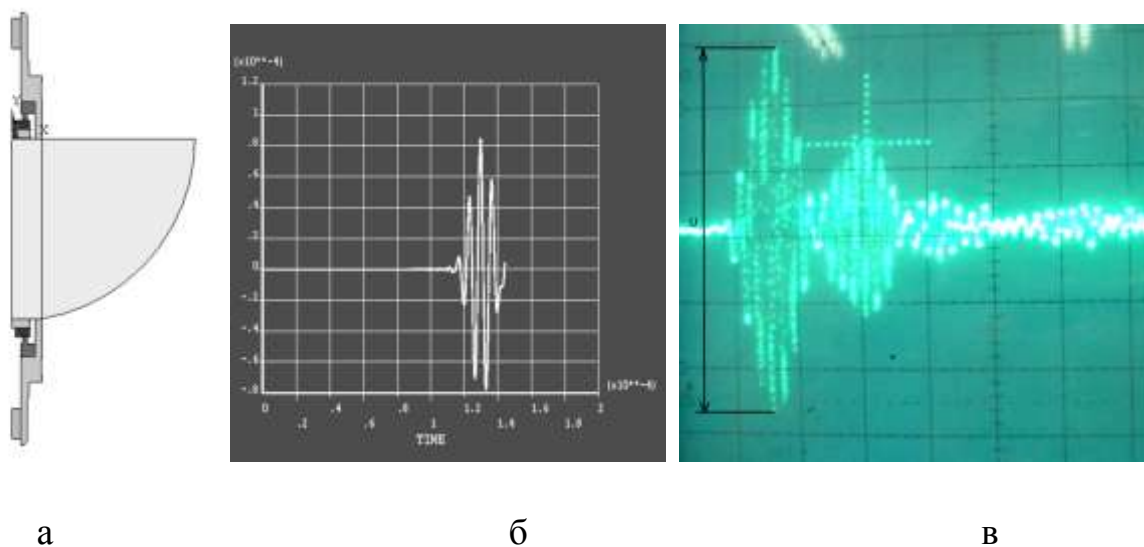


Рис. 5. а – геометрическая модель двух преобразователей – излучателя и приемника; б – расчетная форма сигнала на приемнике при импульсном возбуждении излучателя; в – экспериментально полученный сигнал на приемнике.

При лабораторных испытаниях серии преобразователей ПП-228 установлено:

- рабочая частота пьезоэлектрических преобразователей ПП-228 определенная в гармоническом режиме составляет  $260 \pm 5$  кГц.
- электрическая емкость преобразователей составляет в среднем 914 пФ.
- коэффициент преобразования в гармоническом режиме с мягким закреплением ПП на расстоянии 200 мм составляет в среднем 0.5 мВ/В.



- коэффициент преобразования в импульсном режиме с мягким закреплением ПП составляет 0.15 мВ/В на частоте 251,4 кГц. В жестком закреплении ПП на частоте 251,4 кГц средний коэффициент преобразования 0.26 мВ/В на расстоянии 80 мм.

- время затухания сигнала до уровня шумов около 100 мкс.

ПП-228 испытывались давлением 16 МПа. Коэффициент преобразования практически не изменился после проверки давлением.

В заключении отметим, что многолетние разработки акустических ПП для газовых расходомеров, ведущиеся в ООО «Пьезоэлектрик», привели к созданию ряда моделей ПП, имеющих высокие технические характеристики. Изделия выпускаются большими сериями и успешно работают в составе газовых расходомеров. В то же время потребители выдвигают новые требования по расширению границ применения ПП по температуре среды, давлению, по расширению динамического диапазона, повышению точности измерений, прочности, надежности и т. п., что требует постоянного совершенствования конструкций. Отработанная методика расчета конструкций ПП с применением метода конечных элементов успешно зарекомендовала себя при этих разработках и дает возможность дальнейшего прогресса в совершенствовании датчиков для газовой расходомерии.

#### Литература

1. М. В. Богуш. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электроупругих моделей. М.: Техносфера, 2014.

2. I. Krajcin, M. Uhrig, A. Wrath, T. Dietz, V. Hermann. Impact of regulator noise on ultrasonic flow meters in natural gas. NSFMW2007\_Impact\_Of\_Regulator\_Noise\_On\_Ultrasonic\_Flow\_Meters.pdf, 2015

3. V. Hermann, T. Dietz. Low pressure gas measurement using ultrasonic technology, 2015

4. ISHM2008\_LowPressMeasurement\_by\_UltrasonicTech\_en.pdf, 2015

5. ANSYS, Theory Ref. Rel. 8.0 / Ed. P. Kothnke // ANSYS, Inc. Houston, 2003.

6. Г. Кайно. Акустические волны. М.: Мир, 1990.

Аннотация: Рассматриваются принципы проектирования пьезоэлектрических преобразователей для ультразвуковых расходомеров газа, основанных на время-импульсном методе измерения скорости потока газа. Проектирование осуществляется с применением метода конечных элементов. Многолучевые газовые расходомеры, дающие высокую точность измерения, требуют миниатюризации преобразователя. На основе расчетов разработаны и производятся малогабаритные преобразователи.

Ключевые слова: расходомеры газа, пьезоэлектрический преобразователь, метод конечных элементов, ультразвук, время-импульсный метод измерения.

Сведения об авторах:

Богуш Ольга Михайловна, 1981 г. рожд., аспирант ЮФУ, [bmw@piezoelectric.ru](mailto:bmw@piezoelectric.ru), сайт [www.piezo.su](http://www.piezo.su),

Пикалев Эдуард Михайловна, 1943 г. рожд., математик-программист ООО «Пьезоэлектрик», [bmw@piezoelectric.ru](mailto:bmw@piezoelectric.ru), сайт [www.piezo.su](http://www.piezo.su),

Толмачев Сергей Алексеевич, 1990 г. рожд., Макаров Дмитрий Геннадьевич, 1979 г. рожд., инженер ООО «Пьезоэлектрик».