

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ГАЗА НА ИХ ОСНОВЕ

М.В. Богуш, Е.В. Кузьмичева, Э.М. Пикалев, А.М. Богуш

Ультразвуковые расходомеры основаны на измерении параметров акустических эффектов при прохождении ультразвуковых колебаний через движущийся поток жидкости или газа [1]. Ультразвуковые расходомеры жидкости выпускаются промышленностью уже более 50 лет [2], а освоение ультразвуковых расходомеров газа ведется в течение последнего десятилетия.

Среди ультразвуковых методов измерения объемного расхода можно выделить три основных: доплеровский, время-импульсный и корреляционный методы. Метод измерения выбирается в зависимости от типа контролируемой среды.

Для измерения расхода многофазных (гетерогенных) сред лучше всего подходит доплеровский метод измерения. В основе доплеровского метода лежит изменение частоты при отражении от движущихся неоднородностей измеряемой среды. Перестает действовать в однородных средах.

Для измерения расхода однофазных (гомогенных) сред лучше всего подходит время-импульсный метод измерения. Этот принцип основан на посылке в акустический канал расходомера ультразвуковых сигналов по потоку и против него. Скорость потока определяется по разности времени прохождения сигналов. Данный метод обладает высокой точностью измерения и возможностью обеспечения высокого быстродействия расходомеров (время "реакции" на изменения расхода).

Корреляционный метод измерения основан на принципе определения времени перемещения неоднородностей потока между двумя измерительными сечениями трубопровода. Время, которое проходит между появлением сигналов с приблизительно одинаковой модуляцией в различных измерительных сечениях, соответствует скорости жидкости. Преимущества этого метода измере-

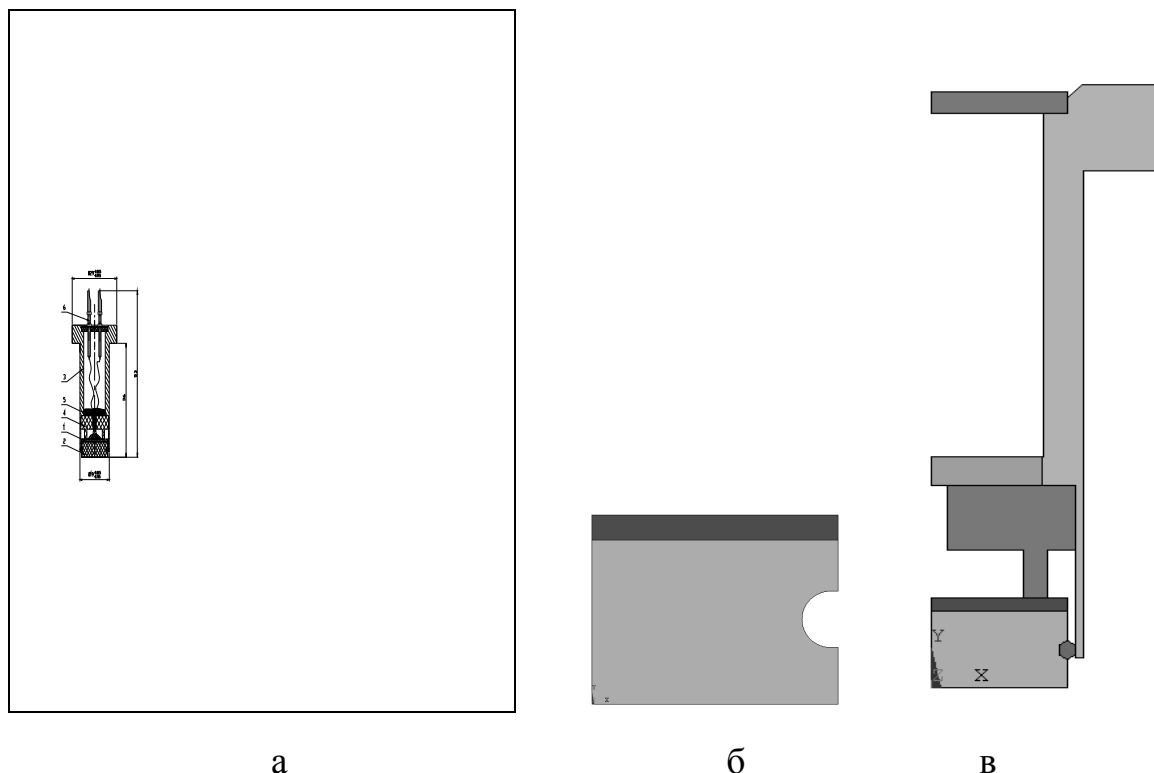
ний следующие: обеспечение низкой зависимости качества измерений от физико-химических свойств жидкости, состояния трубопровода, распределения скоростей по сечению потока и от точности монтажа первичных преобразователей на трубопроводе.

Важнейшим функциональным узлом ультразвуковых расходомеров являются излучатели-приемники (преобразователи) ультразвуковых волн [3], во многом определяющие эксплуатационные возможности и технический уровень приборов. Наиболее часто излучатели-приемники выполняются на основе пьезокерамических элементов [4], причем конструкция и технические характеристики непосредственно пьезоэлектрических преобразователей в документации отечественных и зарубежных производителей, как правило, не приводятся.

Целью настоящей работы является анализ требований к пьезоэлектрическим преобразователям акустических волн в газовой среде, описание методов их проектирования и технических характеристик современных ультразвуковых расходомеров газа на их основе.

Основные требования к пьезоэлектрическим преобразователям акустических волн могут быть сформулированы в наиболее общем виде следующим образом:

- преобразователи должны быть обратимыми;
- излучение и прием акустической волны на расстоянии до 1 м и более;
- рабочая частота от 50 до 200 кГц;
- минимальная передача акустической волны в трубопровод;
- диапазон рабочих температур от минус 50 до 50°C;
- диапазон избыточных давлений от 0 до 6,3 МПа;
- габариты: диаметр излучающей поверхности до 20 мм.



а
б
в

1. ПЭ. 2. протектор. 3. корпус. 4. втулка. 5. заливка. 6. контакты.

Рис.1. Базовая конструкция (а), геометрическая модель ЧЭ (б) и преобразователя в целом (в)

В конструкции использовались следующие материалы: пьезокерамика ЦТС-19 (ПЭ); сталь нержавеющей 12Х18Н9Т (корпус); стеклотекстолит (втулка, гермопереход, крышка для контактов); резина (уплотнительное кольцо); эпоксидный компаунд.

Одним из важнейших элементов преобразователя является протектор, обеспечивающий согласование акустического импеданса $Z = \rho c$ (ρ – плотность материала, c – скорость звука) пьезокерамического материала с газом. Поскольку акустические импедансы пьезокерамики $Z_{пз} = \rho_{пз} \cdot c_{пз}$ и газа $Z_{г} = \rho_{г} \cdot c_{г}$ различаются на несколько порядков, а наилучшим условием их согласования является условие $Z_{пр} = (Z_{пз} Z_{г})^{1/2}$, где $Z_{пр}$ – акустический импеданс протектора, то материал протектора должен иметь по возможности малую плотность и малую скорость звука. Из этих соображений в качестве материала протектора использовался специально разработанный материал, имеющий плотность 674 кг/м^3 и скорость звука около 2600 м/с .

В используемых ранее методах аналитических расчетов [5] обычно принималась одномерная модель, применимая при условии, когда толщина слоев

рассматриваемой системы мала по сравнению с другими размерами; в таком приближении оптимальная толщина протектора равна $\lambda/4$, либо $3\lambda/4$, где λ – длина акустической волны в материале протектора. Однако, когда толщины слоев одного порядка с диаметром пьезоэлемента и протектора, одномерное приближение не дает удовлетворительных результатов, поскольку сам характер колебаний далек от одномерного; более того, в колебательном процессе участвуют не только пьезоэлемент и протектор, но и все тело преобразователя. Намного более достоверные результаты могут быть получены при исследовании колебательной задачи методами конечных элементов [6,7], которые и применяются ниже.

Первый этап работы заключался в исследовании амплитудно-частотных характеристик только чувствительного элемента (ЧЭ), состоящего из пьезоэлемента и протектора. Основной задачей этого этапа было определение оптимальных толщин пьезоэлемента и протектора. Геометрическая модель ЧЭ показана на рис. 1б. При расчетах методом конечных элементов существенно то, что модель преобразователя осесимметрична, благодаря чему задача сводится к двумерной, и модель строится для половины осевого сечения исследуемого тела. Области сечения разбиваются на множество конечных элементов (около 6000 элементов для модели ЧЭ, около 13000 – для всего преобразователя), после чего при заданных граничных условиях решается задача о гармонических колебаниях рассматриваемого тела; в результате вычисляются амплитудно-частотные характеристики (АЧХ).

Граничные условия для ЧЭ в режиме излучения – это заданная амплитуда разности потенциалов на электродах (верхней и нижней поверхности) пьезоэлемента. ЧЭ считается механически свободным. Рассчитывается частотная зависимость средней амплитуды смещения нижней (излучающей) поверхности протектора $U_{cp}(f)$.

В режиме приема сигнала считается, что на нижнюю поверхность протектора действует гармоническое давление заданной (единичной) амплитуды; при этом электроды пьезоэлемента считаются разомкнутыми (режим холостого

хода), и вычисляется соответствующая амплитуда разности потенциалов $V(f)$.

Оценим акустическое давление, создаваемое излучателем на расстоянии $L \gg r_1$, где r_1 – радиус излучающей поверхности. Согласно [5,8], амплитуда переменного давления в звуковой волне, распространяющейся от источника радиуса r_1 , совершающего поршневые колебания с амплитудой U_{cp} , определяется приближенным выражением

$$p = 2\pi^2 r_1^2 \rho_r U_{cp} f^2 / L \quad (1)$$

При отражении звуковой волны от твердой плоской поверхности, нормальной к направлению распространения звука, давление на этой поверхности удваивается, поскольку на падающую волну накладывается отраженная. В результате давление на поверхность приемника

$$p(f) = (4\pi^2 r_1^2 \rho_r / L) \cdot U_{cp} f^2 = A U_{cp} f^2 \quad (2)$$

Умножая теперь величину давления на рассчитанную функцию преобразования $V(f)$, получим важнейшую характеристику пары датчиков – коэффициент преобразования входного напряжения излучателя в выходное напряжение приемника K_{vv} :

$$K_{vv}(f) = A U_{cp}(f) V(f) f^2 \quad (3)$$

Численное значение коэффициента A определим для условий лабораторных испытаний (воздух, температура 20°C, давление 0,1 МПа, $\rho_r = 1.205 \text{ кг/м}^3$, расстояние $L = 0.3 \text{ м}$) и $r_1 = 8,5 \text{ мм}$: $A = 4\pi^2 r_1^2 \rho_r / L = 0,01146 \text{ кг/м}^2$.

Расчетные частотные характеристики для пары идентичных чувствительных элементов приведены на рис. 2.

Семейство частотных характеристик на рис. 2а получено при постоянной толщине пьезоэлемента и различных толщинах протектора. Оптимальная характеристика на рисунке выделена жирной черной линией. В максимуме достигается значение $K_{vv} = 1,5 \text{ мВ/В}$. При увеличении толщины протектора максимум K_{vv} снижается и смещается в область более низких частот. Другой максимум в области 140 кГц, появляющийся при $h_1 = 12,5 \text{ мм}$, не превосходит 0,4 мВ/В.

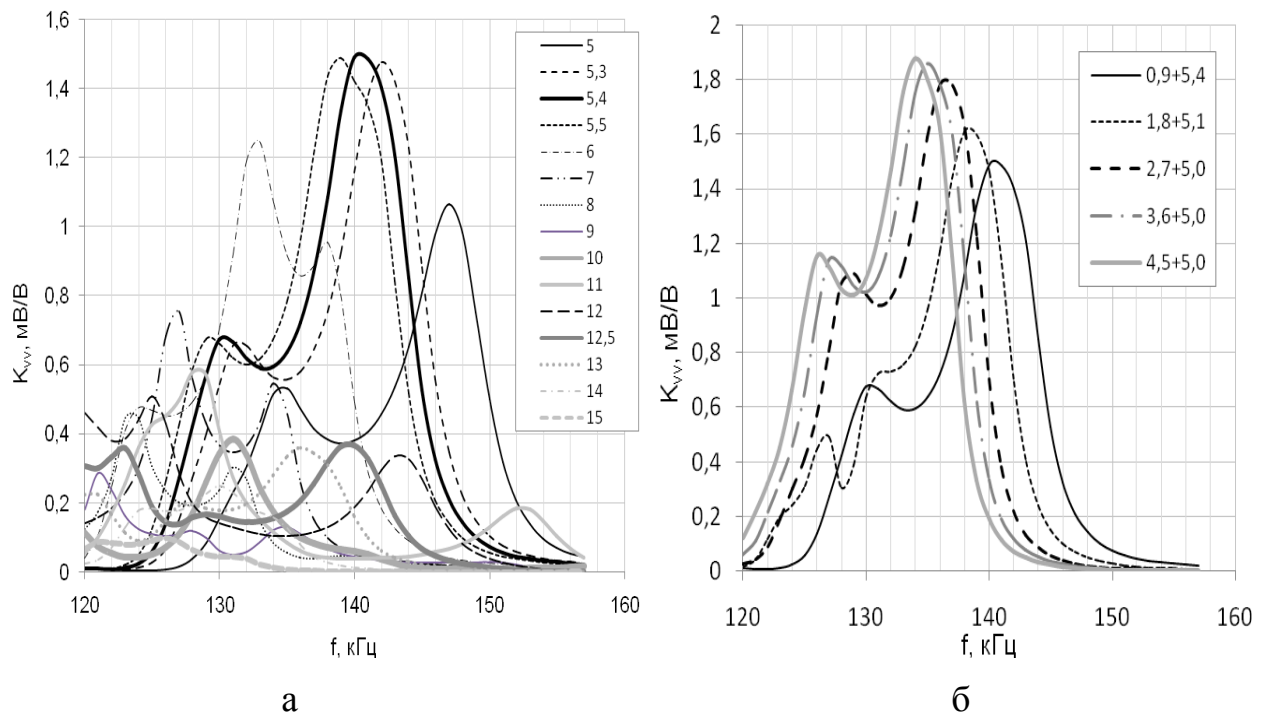


Рис.2. Влияние толщины протектора (а) и пьезоэлемента (б) на АЧХ пары ЧЭ в режиме излучения и приема

При вариациях толщины пьезоэлемента h для каждой величины h выбиралась оптимальная по h_1 характеристика; семейство таких оптимизированных по толщине протектора характеристик для разных толщин пьезоэлемента приведено на рис. 2б, где справа указаны толщины пьезоэлемента и протектора. Как видно из рисунка, увеличение толщины пьезоэлемента приводит к некоторому улучшению характеристик ЧЭ: возрастанию максимальной величины коэффициента преобразования, расширению рабочей полосы частот, при незначительном снижении рабочей частоты. Отметим, что увеличение толщины пьезоэлемента представляется целесообразным и с точки зрения повышения устойчивости к резким изменениям температуры, вызывающим дополнительные пьезоэлектрические напряжения.

Далее проводился расчет характеристик $K_{vv}(f)$ для пары преобразователей при оптимизированной толщине пьезоэлемента и протектора. Геометрическая модель преобразователя 223 в сборе показана на рис. 1в, где приведена половина осевого разреза преобразователя. Механические граничные условия, прини-

маемые при расчетах – это условия закрепления фланца преобразователя: смещения на его верхней и нижней поверхностях полагались равными нулю.

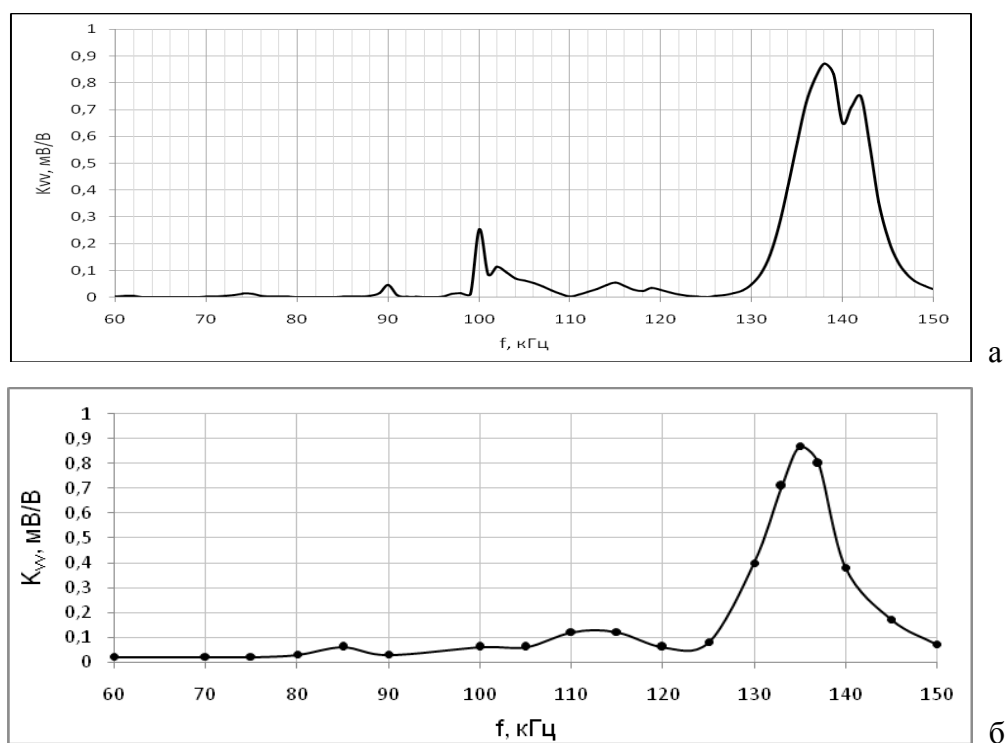


Рис. 3. Расчетная (а) и экспериментальная (б) АЧХ пары преобразователей в режиме излучения и приема

На рис. 3 приведены расчетная и экспериментальная характеристики $K_{vV}(f)$, которые находятся в хорошем соответствии друг с другом. Рабочий пик находится в области частот 135 – 140 кГц, его высота около 0,9 мВ/В, ширина на уровне 0,5 около 9 кГц.

На основе приведенных исследований в ООО «Пьезоэлектрик» изготавливаются ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи 223 и 223М (рис. 4). Эти преобразователи применяются в расходомерах газа Dymetic 1223-T и 1223-K фирмы «Даймет» (Тюмень), СГП-1 «Белгазтехника» (Минск). Ведутся работы по созданию ультразвуковых расходомеров газа на основе преобразователей 223 на предприятиях «Ирвис» (Казань), «Вымпел» (Москва), «Техноавтомат» (Энгельс), работающих на время-импульсном и корреляционном принципах действия.



Рис. 4. Внешний вид преобразователей 223 и схема их применений в расходомерах газа.

В таблице 1 приведены основные характеристики ультразвуковых преобразователей типа 223 и 223М.

Таблица 1. Основные характеристики датчиков типа 223 и 223М

Параметры	Модель	
	223	223М
Резонансная частота, кГц	130-150	
Электрическая емкость, пФ не менее	700	
Удельная чувствительность, мВ/В, на расстоянии 0,3 м при атм. давлении	>0,8	
Максимальное избыточное давление, МПа	2,5	6,3
Диапазон рабочих температур, °С	±50	
Габаритные размеры (без выводов), мм, не более	Ø29 x Ø19 x 52	

Ультразвуковые расходомеры в последние годы находят широкое применение во многих отраслях промышленности. Они с успехом заменяют расходомеры других типов при измерении практически любых сред. При этом рынок ультразвуковых расходомеров растет заметно быстрее, чем других типов приборов учета [9]. Объясняется это тем, что ультразвуковые расходомеры имеют ряд существенных преимуществ перед остальными средствами измерения расхода, включая высокую точность, широкие динамические диапазоны, простота калибровки и надежность.

Дальнейшее развитие пьезоэлектрических преобразователей для ультразвуковых расходомеров направлено на расширение диапазонов рабочих температур и давлений, расширение динамических диапазонов измерений за счет повышения помехоустойчивости к акустическим сигналам, распространяющимся по трубе и градиентам температуры.

Литература

1. Богуш М.В. Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. III. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Изд-во СКНЦ ВШ, Ростов-на-Дону, 2006. 335 с.
2. Кремлёвский П.П. Расходомеры и счетчики количества. Л.: Машиностроение, 1989. 701 с.
3. [Богуш М.В., Пикалев Э.М. Ультразвуковые излучатели-приемники для газа// В кн. Фундаментальные проблемы функционального материаловедения, пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий. ПЬЕЗОТЕХНИКА - 2005. Материалы международной научно-практической конференции.](#)
Ростов-на-Дону, Азов, изд-во РГПУ, 2005. С. 13-17.
4. Белинкур Д., Керран Д., Жаффе Г. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в ультразвуке//Физическая акустика/ Под ред. У. Мэзона. Т. 1. Ч. А. М.: Мир,1966. С. 204-324.

5. Кайно Г. Акустические волны: устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. Изд-во Мир, 1990. 625 с.
6. Богуш М.В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков с использованием конечно-элементных математических моделей. «Приборы», 2007, № 12. С. 30-38.
7. Богуш М.В. Анализ и синтез пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей. Материалы третьей Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Домбай, 2008. Т 1. С. 228-230.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика, Т. VI. Гидродинамика, - М.: Наука, 1986. – 736 с.
9. Покрас С.И., Покрас А.И., Гришанова И.А. Ультразвуковая расходометрия: как и зачем повышать точность измерений. Сборник трудов 23-й конференции «Коммерческий учет энергоносителей», 05. 2006.