

2. E. Mori, K. Itoh, A. Imamura. Analysis of short column vibrator by apparent elasticity method and its application // Ultrasonics International 1977 conference proceedings. – 1977. – p. 262-265
3. Дж. В. Стрэтт (Лорд Рэлей). Теория звука, т. 1. М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – С. 274
4. Neppiras, E A. The prestressed piezoelectric sandwich transducer Ultrasonics International 1973 Conference Proceedings Butterworths, Borough Green, UK (1973)
5. Shuyu, L. Design of Piezoelectric Sandwich Ultrasonic Transducers with Large Cross-Section // Applied Acoustics, 1995 – v. 44 – p. 249-257
6. Dominguez, R., Ranz, C. Sandwich transducer, Simplified Mathematical Model I // Acustica, 1973 – v. 29 – № 3 – p. 156-161

УДК 62-791.2

В.К. Хамидуллин¹, Р.Н. Малаханов¹, А.А. Гнедов²
УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ДАТЧИКИ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ МНОГОСЛОЙНЫМИ
ВОЛНОВОДАМИ ДЛЯ РАСХОДОМЕРОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
ЖИДКИХ СРЕД

¹Гос. Университет Аэрокосмического Приборостроения
Россия, 190000, С. Петербург, ул. Большая Морская, д.67
Тел.: (812) 494-7041; E-mail: vakif_hamidullin@mail.ru

²ЗАО Взлет, Россия, 190121,
ул. Мастерская, д.9

Исследовано акустическое поле, возбуждаемое ультразвуковым датчиком с длинным многослойным волноводом кольцевой структуры. Рассчитано трехмерное акустическое поле, возникающее при импульсном воздействии плоских кольцевых излучателей. Требуемые параметры волновода были достигнуты подбором ширины колец и зазора между ними. Многослойные волноводы трубчатой конструкции были изготовлены с использованием фольги из углеродистой стали толщиной 0,2 мм и нержавеющей стали толщиной 0,1 мм. Проведены натурные испытания датчиков с волноводами длиной 60 мм. Испытания показали прохождение короткого волнового пакета на частоте 1 МГц с отношением сигнал/шум около 20.

ВВЕДЕНИЕ

При измерении расхода жидкости в трубопроводе время-импульсным методом в широком диапазоне температур и давлений необходимо применять датчики с металлическими волноводами. Длинный волновод обеспечивает защиту пьезоэлемента от высоких температур и давлений, удаляя его на достаточное расстояние. Волновод должен эффективно передавать акустический сигнал в движущуюся жидкость и принимать сигнал из жидкости. Для корректного измерения скорости жидкости необходимо сформировать узконаправленный луч.

В данной работе описаны теоретические и практические результаты по ограничению влияния дифракции и паразитных эхо-сигналов при передаче в жидкость акустического сигнала от волновода с многослойной кольцевой структурой. Основная задача – получить достаточно короткий импульс с быстрым затуханием.

Эффект дифракции акустической волны приводит к увеличению длительности переходного процесса. Для уменьшения краевых эффектов применяются различные рассеивающие структуры. Не так давно Ларри Линнворт и др. [1] применили пучок тонких металлических стержней диаметром по 1 мм, плотно упакованных в цилиндрическую обойму. Йоко Оно, Чен и др. [2] для борьбы с паразитными эхо-сигналами покрыли волновод крупинками стального порошка. Разработано несколько вариантов волноводов и демпферов из трубок, например, несколько концентрических тонкостенных трубок [1] или рулон из металлического листа [3, 4].

Исследование акустического поля на излучающем конце датчика проведено методом импульсного возмущения. Излучающая и приемная поверхность волновода рассматривается как набор концентрических колец. Проведен расчет 3-мерного акустического поля, возникающего после одиночного импульсного сигнала. Излучатель - набор плоских колец разного профиля, например, конец волновода, составленного из вложенных друг в друга трубок.

РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО ПОЛЯ КОЛЬЦЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Метод импульсного возмущения описан в 1939 году А.А. Харкевичем [5]. П.Р. Степанишен [6] представил связь между распространением импульсного возмущения и нормальной скоростью частиц в форме интеграла по объему и по времени. Метод импульсного возмущения был далее применен для кольцевых датчиков Харкевичем [7], Хайманом и Вейтом [8] и другими исследователями. Переходное поле для вогнутой поверхности из концентрических колец было исследовано Ардити и др. [9].

Теоретически, луч без дифракции может возбуждаться только бесконечной апертурой. На практике луч с ограниченной дифракцией в некотором приближении можно получить и на конечной апертуре. Лу и Гринлиф [10] предложили возбуждать кольца не одновременно, а с задержкой, вычисленной как функция Бесселя от радиуса кольца. В этом случае удается получить луч с малой дифракцией на плоской конечной структуре из концентрических колец. Для этого радиусы колец должны давать нулевые значения функции Бесселя. В [11] С. Хольм показал, что для функции Бесселя нулевого порядка можно возбудить луч с ограниченной дифракцией датчиком кольцевой структуры с элементами одинаковой площади.

Принципиальная цель данной работы – изучение эффекта кольцевого квантования применительно к лучу с ограниченной дифракцией для датчика с многослойным волноводом.

Метод импульсного возмущения вычисляет реакцию на одиночный импульс. Реакция зависит от формы излучающей области датчика и координат точки наблюдения. Рассмотрим давление p в точке r в момент времени t :

$$p(r, t) = \rho \cdot \frac{\partial}{\partial t} X(r, t), \quad (1)$$

где X – потенциал скорости, ρ – плотность среды.

Точное выражение для вычисления объемной реакции на импульс от плоского кольца можно получить согласно [5]. Элементарное давление в точке наблюдения A (Рис. 1) на плоскости, параллельной поверхности датчика и расположенной на расстоянии z от конца датчика, определяется выражением

$$\partial p(r, t) = \rho \cdot \frac{\partial}{\partial t} (dX(r, t)) = \frac{\rho v ds}{2\pi} \delta\left(t - \frac{r}{c}\right), \quad (2)$$

где ds – элементарная площадь на поверхности датчика, c – скорость звука в среде, v – нормальная составляющая скорости частиц на поверхности апертуры, r – расстояние от точки A до элементарной площади ds кольца, $\delta(\cdot)$ – дельта-функция Дирака.

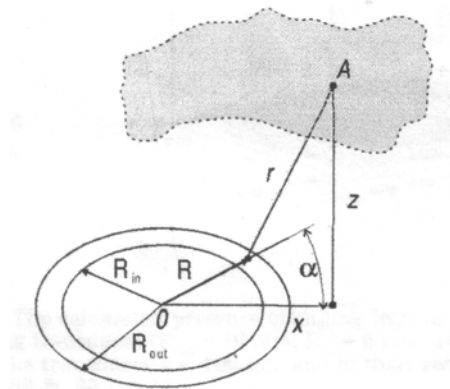


Рис. 1. Геометрическая схема для кольцевого датчика.

Теперь в соответствии с принципом Гюйгенса мы получаем выражение для расчета давления в точке A как реакции на импульс:

$$p = \frac{\rho v}{2\pi} \int_0^{R_{out}} \int_{R_{in}}^{2\pi} \frac{1}{r(R, \alpha)} \delta\left(t - \frac{r(R, \alpha)}{c}\right) R dR d\alpha \quad (3)$$

Функция $r(R, \alpha)$ в (3) может быть найдена по геометрической схеме на Рис.1.

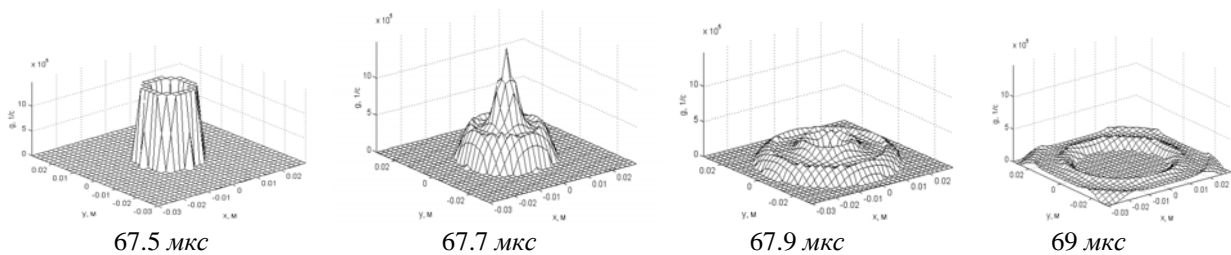


Рис. 2. Переходной процесс для поля давления в 3-мерном виде в дискретные моменты времени для апертуры датчика в виде широкого кольца ($R_{out} = 10$ мм, $R_{in} = 5$ мм, $c = 1482$ м/с), возбужденного одиночным импульсом, в параллельной плоскости на удалении $z = 100$ мм.

Взяв двойной интеграл в (3), мы получаем точное выражение для вычисления давления в точке A

$$p = \frac{\rho v}{\pi} \left[(\pi + \beta(ct)) \mathcal{H}\left(t - \frac{r_1}{c}\right) - (\pi + \beta_1(ct)) \mathcal{H}\left(t - \frac{r_2}{c}\right) \right] + \frac{\rho v}{\pi} \left[(\pi + \beta(ct)) \mathcal{H}\left(t - \frac{r_3}{c}\right) - (\pi + \beta_1(ct)) \mathcal{H}\left(t - \frac{r_4}{c}\right) \right] \quad (4),$$

$$\text{где } \beta(ct) = \arccos \frac{c^2 t^2 - z^2 - R_{out}^2 + x^2}{2x\sqrt{c^2 t^2 - z^2}}, \quad \beta_1(ct) = \arccos \frac{c^2 t^2 - z^2 - R_{in}^2 + x^2}{2x\sqrt{c^2 t^2 - z^2}},$$

$$r_1 = \sqrt{z^2 + (R_{in} - x)^2}, \quad r_2 = \sqrt{z^2 + (R_{out} - x)^2}, \quad r_3 = \sqrt{z^2 + (R_m + x)^2}, \quad r_4 = \sqrt{z^2 + (R_{out} + x)^2},$$

R_{in} и R_{out} - внутренний и внешний радиусы кольца соответственно, $h(t)$ -функция Хевисайда, v -константа.

Рассчитанные на основании (4) поля давления изображены на Рис. 2 и Рис. 3(а) [12]. Аналогичные результаты для очень тонкого кольца показаны на Рис.3(б). Первый максимум давления приходит через 67.47 мкс после одиночного импульса и повторяет форму датчика. Следующий максимум появляется, когда большинство волн собирается в центральной точке. Это время вычисляется как время прихода волны из центральной (по ширине) области кольца, для $R_m = 7,5$ мм оно составляет $t_m = 67.66$ мкс. Результаты для широкого кольца показаны на Рис.2 и Рис. 3а.

В случае Рис. 3,а процесс затухания медленный и передаваемая энергия велика. В случае узкого кольца (Рис.3 б) затухание происходит быстрее, но и передаваемая энергия существенно меньше. Требуется подобрать количество колец, их ширину и зазоры между ними, чтобы получить требуемую форму суммарного акустического поля.

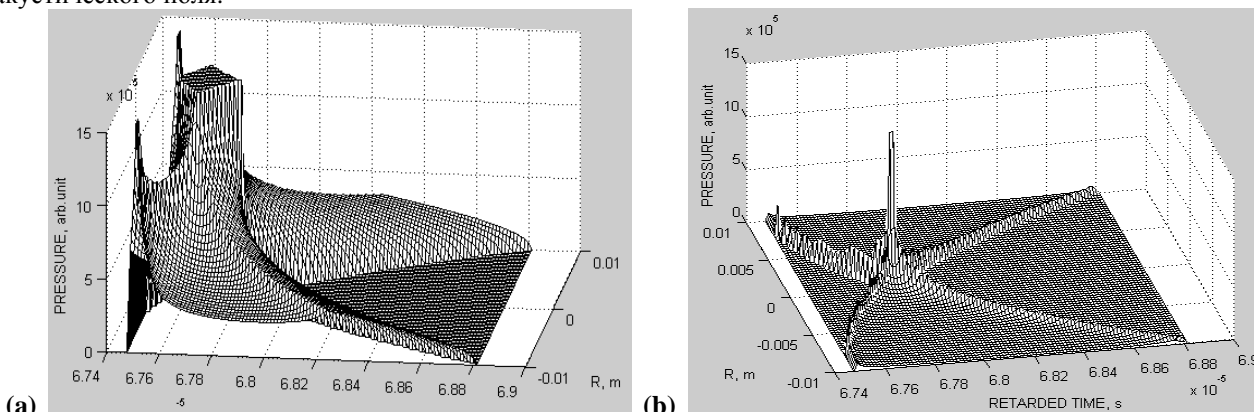


Рис.3. Переходной процесс (диаметральное сечение) для поля давления во во времени: (а) широкое кольцо ($R_{in}=5$ мм, $R_{out}=10$ мм), (б) узкое кольцо ($R_{in}=9.7$ мм, $R_{out}=10$ мм).

Для время-импульсного метода измерения расхода требуется четкий передний фронт акустического сигнала и быстрое затухание. Два варианта кольцевой апертуры показаны на Рис.4 для: (а) распределения Бесселя из 6 колец [10, 11] и (б) оригинального распределения колец, обеспечивающего равную амплитуду и длительность импульсов, порожденных каждым кольцом из набора 11 колец. По диаграммам, приведенным на Рис.4 (б) и на Рис.4(а), легко видеть, что переходный процесс заканчивается быстрее, чем в случае распределения Бесселя.

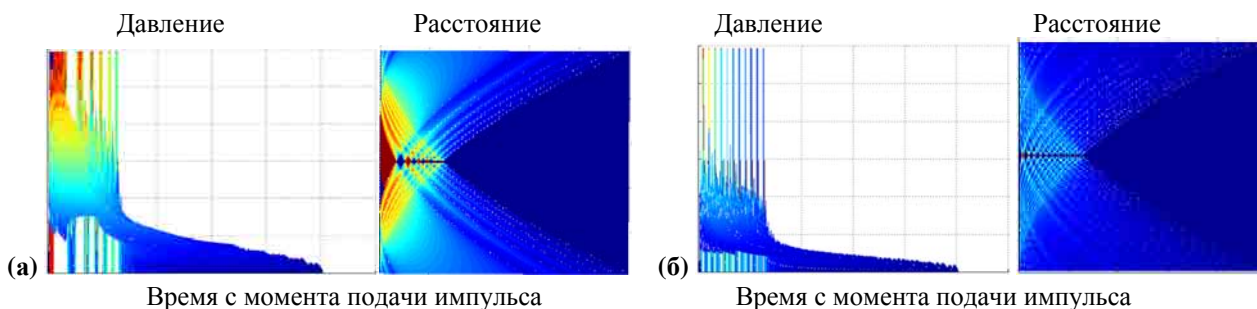


Рис. 4. Вид сбоку и вид сверху на 3-мерный (время, давление, расстояние) переходный процесс для поля, возбужденного одиночным импульсом (сечение по диаметру) для датчиков с различной апертурой колец: распределение Бесселя из 6 колец (а) и оригинальный набор из 11 колец (б).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для натурного эксперимента были изготовлены образцы с толщиной кольца от максимальной до минимально возможной технологически (Рис. 5).

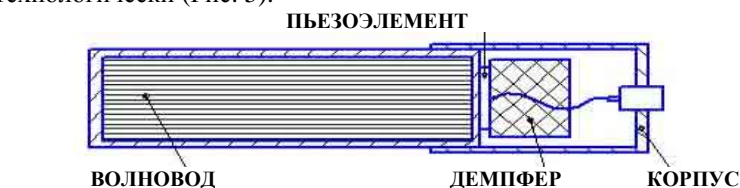


Рис. 5. Датчик с металлическим многослойным волноводом.

Было изготовлено 14 разных вариантов волноводов: сплошной, из нескольких трубок и из рулона фольги. Длина волноводов составила 60 и 100 мм, внешний диаметр стального кожуха D_{out} 32 мм, диаметр пьезоэлемента 20 мм, применялась фольга из меди и стальных сплавов толщиной 0,2, 0,1 и 0,06 мм. Короткий импульс длительностью в один период на частоте 1 МГц передавался от излучателя к приемнику через слой воды толщиной 100 мм и 200 мм. Для излучателя и приемника использовались датчики одинаковой конструкции. Самые лучшие результаты были получены для фольги из углеродистой стали толщиной 0,2 мм и фольги из нержавеющей стали толщиной 0,1 мм. Осциллограммы переданного и принятого сигналов приведены на Рис. 6(б) и 6(с).

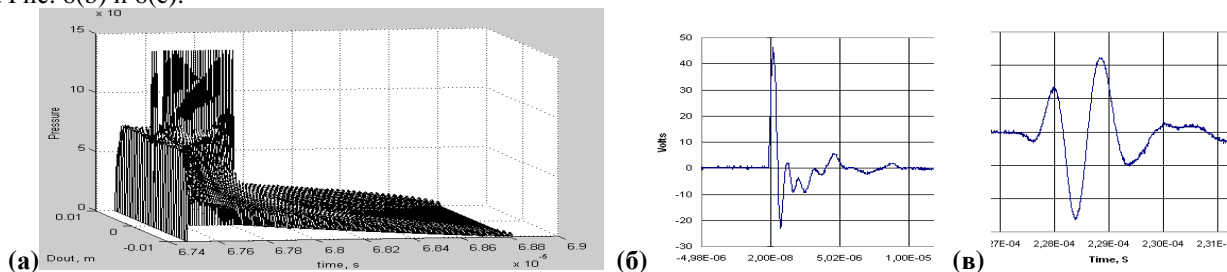


Рис.6. Расчет поля давления для 50 колец (а), осциллограмма на пьезоэлементе-излучателе (б), осциллограмма на приемнике для датчиков с 60-мм волноводами из фольги нержавеющей стали толщиной 0,1 мм для 1 МГц (с).

Для фольги толщиной 0,1 мм получилось 50 слоев. Расчет распространения импульсного возмущения для этого случая показано на Рис. 6(а). В первый момент проходит очень короткий импульс длительностью менее 1 нс с максимальной амплитудой давления. Затем в течение около 300 нс наблюдается 50 импульсов игольчатой формы для каждого из 50 колец. В связи с невозможностью измерить непосредственно объемное поле давления с разрешением по времени порядка 1 нс приходится ограничиться теоретическим расчетом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод расчета реакции акустического поля преобразователя с большим количеством концентрических кольцевых элементов на импульсное воздействие, что обеспечивает возможность оптимизации параметров с точки зрения уменьшения влияния дифракции. Представлен пример практической реализации преобразователя с многослойным достаточно длинным волноводом трубчатой конструкции с использованием фольги из углеродистой стали толщиной 0,2 мм и нержавеющей стали толщиной 0,1 мм. Использование рассмотренных датчиков в ультразвуковых расходомерах обеспечивает возможность измерения расхода высокотемпературных жидких сред на нефтеперерабатывающих заводах, ядерной энергетике и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] L. C. Lynnworth, Y. Liu and J. A. Umina, Extensional bundle waveguide techniques for measuring flow of hot fluids// IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr./ vol.52, no. 4, pp.538-544, April 2005.
- [2] Y. Ono, C.-K. Jen, J.-F. Moisan and C.-Y. Su, Aluminum buffer rods for ultrasonic monitoring at elevated temperatures// IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr./ vol.52, no. 6, pp.1042-1047, June 2005.
- [3] A. M. Heijnsdijk and J. M. van der Klooster, //Ultrasonic waveguide/ U.S. Patent 6,400,648, Jun. 4, 2002.
- [4] Н.В. Бабкин, Демпфер для ультразвукового датчика/ патент СССР, 172543, 1964.
- [5] А.А. Харкевич, Дифракция упругой взрывной волны на прямолинейной грани и круглом отверстии// Журнал технической физики, АН СССР/ Москва, том 9, № 6, 1939.
- [6] P. R. Stepanishen, Transient radiation from pistons in an infinite planar baffle// J. Acoust. Soc. Am.(49), pp. 1629-1638, 1971.
- [7] А.А. Харкевич, Теория электроакустических преобразователей волновые процессы. Москва, Наука, 1973.
- [8] A. J. Hayman and J. P. Weight, Transmission and Reception of Short Ultrasonic Pulses by Circular and Square Transducers// J. Acoust. Soc. Am. 66 (4), Oct. 1979.
- [9] M. Arditi, F. S. Foster, and J. W. Hunt, Transient field of concave annular arrays// Ultrasonic Images, vol. 3, pp. 37-61, 1981.
- [10] J.-Y. Lu and J. F. Greenleaf, Ultrasonic nondiffracting transducer for medical imaging// IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol.37, no. 5, pp. 438-447, September 1990.
- [11] S. Holm, Bessel and conical beams and approximation with annular arrays // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol.45, no. 3, pp. 712-718, May 1998.
- [12] V. K. Hamidullin, R. N. Malakhanov and E. V. Khamidoullina, Statics and dynamics of ultrasonic flowmeters as sensing elements for power control system // Proc. of 2001 IEEE Joint International Conference on Control Application and International Symposium on Intelligent Control, September 5-7, 2001, Mexico City, Mexico, pp. 680-685.