

В. Г. Савин, Н. И. Штефан, В. М. Шарапов

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

### Введение

Усложняющиеся режимы эксплуатации пьезоэлектрических преобразователей, которые связаны с использованием возбуждающих электрических сигналов сложной конфигурации, а также наличием других факторов, требующих учета переходных процессов в пьезопреобразователях, обуславливают повышенные требования при выборе исходных математических моделей, описывающих взаимное преобразование их механических и электрических полей. При этом важно располагать информацией о достоверности, с которой эти модели описывают реальные физические процессы. В работах [1–5], [7] и последующих публикациях, посвященных теоретическим исследованиям нестационарных режимов работы цилиндрических и сферических преобразователей, в качестве расчетной применялась модель линейной теории электроупругости или электроупругих цилиндрических и сферических оболочек [6]. На самом деле, форма реального преобразователя отличается от идеальной цилиндрической или сферической формы наличием торцевых крышек для цилиндрического преобразователя, или горловины с отверстием, необходимого для крепления сферического преобразователя.

Целью настоящей работы является проведение экспериментальных исследований, происходящих в цилиндрическом пьезоэлектрическом преобразователе, сопоставление результатов этих исследований с теоретическими, полученными в рамках прикладной и линейной теории электроупругости для кругового цилиндрического преобразователя.

### 1. Описание измерительной установки

Измерения проводились в воздухе, где измерялись упругие смещения  $W$  наружной поверхности пьезоэлектрического преобразователя. В качестве объекта измерений был выбран цилиндрический излучатель, выполненный в виде поляризованного в радиальном направлении тонкостенного цилиндра, у которого электроды разделены разрезами в осевом направлении на две равные части. На рис. 1 линиями  $dd_1$  и  $bb_1$  обозначены линии разрезов электродов в осевом направлении (один электрод  $d - a - b$ ,

второй  $b - c - d$ ). Геометрические параметры цилиндра (радиус серединной поверхности  $R$ , высота  $l$ , и толщина  $h$ ) имели значения  $R = 0,0675$  м,  $l = 0,38$  м,  $h = 0,006$  м. На торцах излучателя располагались круглые металлические пластины (крышки). Блок-схема измерительной установки приведена на рис. 1.

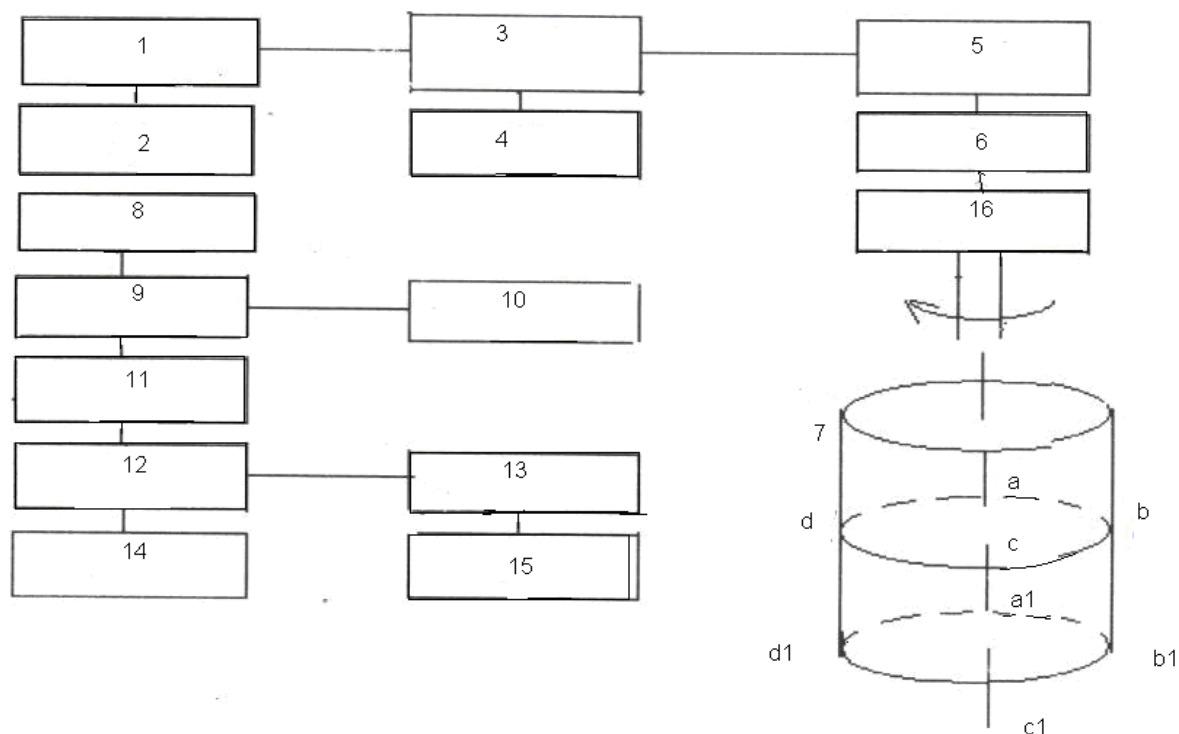


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки

В процессе работы генератора 1 вырабатывался электрический тональный сигнал, работа которого контролировалась прибором 2 (вольтметром). Модулятор 3 осуществлял преобразование тонального электрического сигнала в импульс, определяя его длительность, начальную фазу и частоту следования. С его помощью удавалось подводить к излучателю стабильный импульс, форма которого отражалась на экране осциллографа 4. Далее сигнал проходил через усилитель 5 и блок коммутации 6, позволяющий подключать выбранные пары электродов преобразователя 7 к тракту возбуждения.

Смещение наружной поверхности излучателя в радиальном направлении регистрировалось бесконтактным способом с помощью вихретокового датчика 10, связанного с автогенератором 9, получающим энергию от блока питания 8. Для устранения влияния паразитной электрической амплитудной модуляции использовался усилитель-ограничитель 11. Выделение сигнала модулирующей частоты из частотно-модулированного напряжения автогенератора осуществлялось частотным детектором 12. Пиковый детектор 13 использовался для определения девиации частоты, пропорциональной амплитуде перемещений. Первоначальный статический зазор

между датчиком и наружной поверхностью преобразователя, а также осциллограмма смещения определялись с помощью измерительных вольтметров 14 и 15, соответственно. Описанная измерительная установка обеспечивала измерение смещений от 0,1 до 100 микрометров в диапазоне частот от 0 до 20 кГц.

Градуировка установки проводилась в статическом и динамическом (с помощью эталонного вибростола) режимах, которая показала, что средняя квадратическая погрешность измерения не превышала 3,6%.

Основная трудность при разработке измерительной установки заключалась в создании вихретокового датчика, обеспечивающего приемлемую точность измерений при толщине металлических электродов преобразователя, не превышающей единиц микрометров.

Добиться указанной погрешности на установке удалось за счет повышения несущей частоты автогенератора до величин 1,1 МГц, собрав его по емкостной трехточечной схеме. Чувствительный элемент датчика выполнен в виде катушки индуктивности диаметром  $5 \cdot 10^{-3}$  м, состоящей из ферритового сердечника, на который с шагом  $0,3 \cdot 10^{-3}$  м намотан провод ПЭВ.

## 2. Экспериментальные исследования и их анализ

Результаты измерений (штриховые линии) и расчетов, выполненных в соответствии с моделью тонких электроупругих оболочек (сплошная линия) и линейной теорией электроупругости (штрихпунктирная линия), представлены на рис. 2 – рис. 5. На рис. 2 – рис. 5 измерения и расчеты проводились для центрального сечения цилиндра.

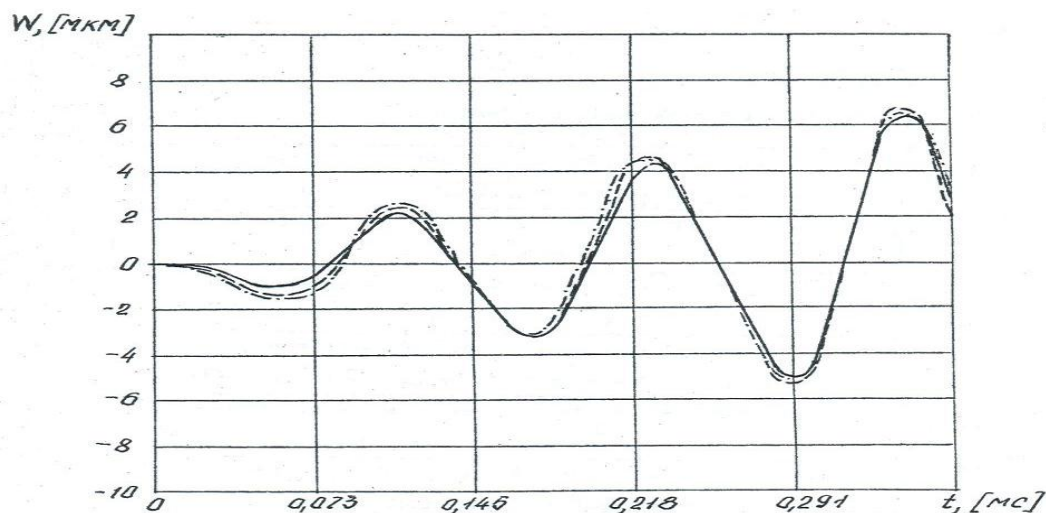


Рис. 2. Осциллограмма упругих смещений поверхности цилиндра

Рис. 2 иллюстрирует упругие смещения при осесимметричном электрическом возбуждении излучателя (сигнал подавался на все электроды преобразователя). Частота заполнения подводимого импульса задавалась

равной собственной частоте пульсирующих колебаний цилиндра ( $f = 7,9 \text{ кГц}$ ).

На рис. 3 – рис. 5 приведены смещения в случае несимметричного возбуждения излучателя, когда электрический сигнал подводился к половине его поверхности (секция  $d-a-b$ ). Остальная пара электродов (секция  $b-c-d$ ) – закорочена. Вихретоковый датчик располагался в точках  $a, b, c$  рис. 1.

Указанным вариантам измерений и расчетов соответствуют кривые, изображенные на рис. 3 (точка  $a$  рис. 1), рис. 4 (точка  $b$  рис. 1), рис. 5 (точка  $c$  рис. 1), соответственно. Здесь возбуждение преобразователя проводилось на резонансной частоте осциллирующих колебаний пьезоэлектрической оболочки ( $f = 11,2 \text{ кГц}$ ).

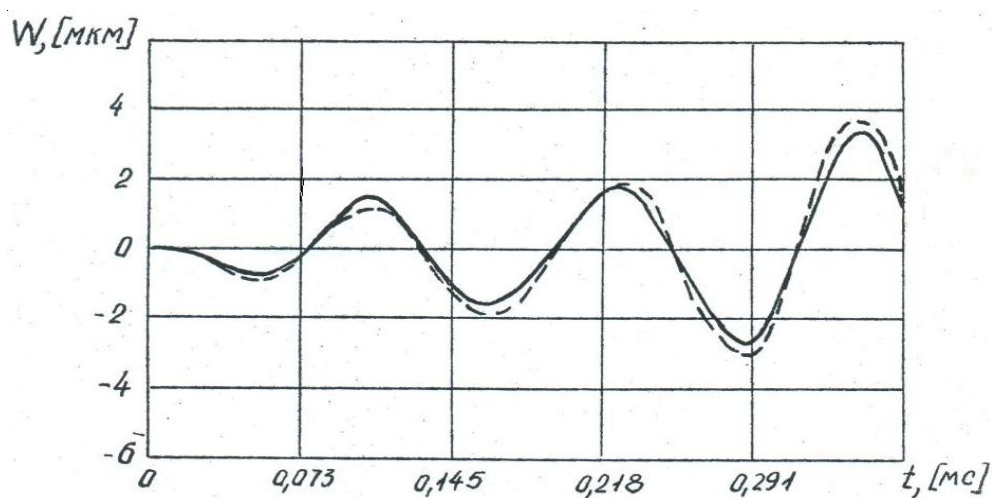


Рис. 3. Осциллограмма поверхности смещения в точке  $a$

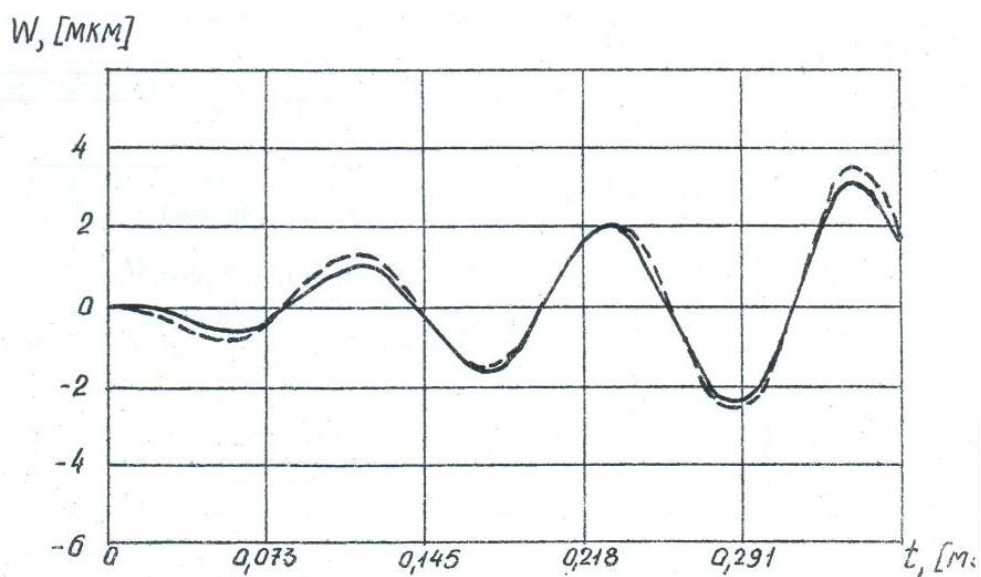


Рис. 4. Осциллограмма поверхности смещения в точке  $b$

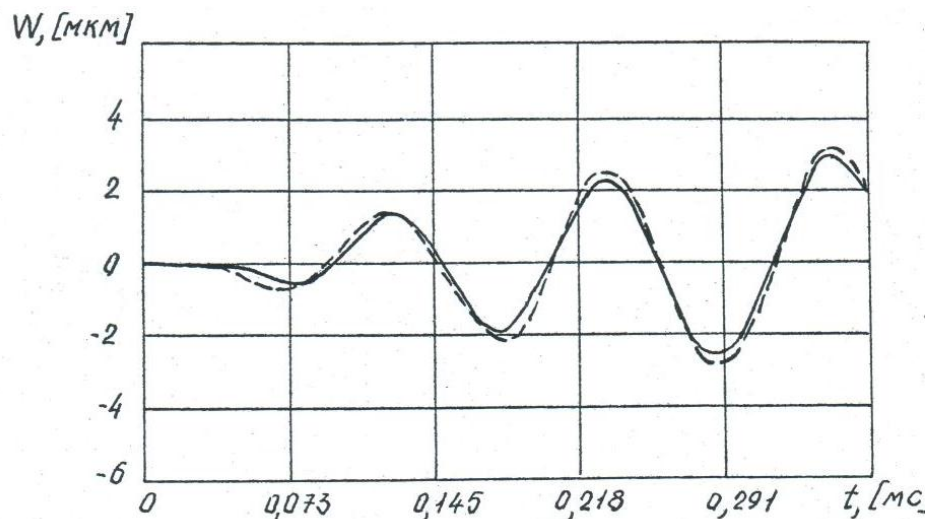


Рис. 5. Осциллограмма поверхности смещения в точке  $c$

Сопоставление полученных экспериментальных результатов и расчетов перемещений, выполненных с привлечением различных моделей, свидетельствует об их хорошем совпадении. Отличие экспериментальных и расчетных значений смещений в экстремальных точках составляет по прикладной теории 8% и практически отсутствует (в пределах точности проведенных расчетов и измерений) по линейной теории электроупругости.

### Выводы

Проверка соответствия принятой математической модели физическому процессу осуществлялась на примере сравнительно толстостенного цилиндра ( $hR^{-1} = 0,9$ ), т.е. для случая, когда использование теории оболочек может вызвать опасения. Необходимо отметить, что принятые геометрические параметры пьезоэлектрического цилиндра характерны для реальных излучателей. В работе рассмотрено возбуждение преобразователя на сравнительно низких частотах. По-видимому, с возрастанием частоты подводимого электрического сигнала или при возбуждающем воздействии электрическими импульсами со скачками напряжений рассогласование экспериментальных и теоретических (базирующихся на прикладной теории) результатов может увеличиться. Однако, излучаемые здесь режимы являются рабочими для гидроакустических систем и их исследование представляет наибольший интерес. На основании выполненных расчетов и экспериментов можно сделать вывод о достаточно высокой точности и в целом применимости модели бесконечно длинных пьезоэлектрических оболочек, основанной на гипотезах Кирхгофа-Лява, в нестационарных задачах гидроупругости, при расчетах электроакустических преобразователей.

## Список использованной литературы

1. Бабаев А. Є. Акустические и механические поля радиально поляризованного цилиндрического вибратора при импульсном электрическом возбуждении // А. Є. Бабаев, А. А. Лейко, В. Г. Савин / Акуст. журн. - 1989. – т. 35, № 2 - с. 111 - 217.
2. Бабаев А.Є. Действие нестационарного электрического сигнала на пьезокерамическую цилиндрическую оболочку, контактирующую с жидкостью. // А. Є. Бабаев, В. Г. Савин / Акуст. журн. -1987. – т. 33, № 5 - с. 938 - 940.
3. Савин В. Г. Излучение акустических импульсов сферическим пьезовибратором // В. Г. Савин / Акуст. журн. –1991. – т.37, № 6 – с. 1194 - 1198.
4. Савин В. Г. Преобразование акустических импульсов в электрические цилиндрической оболочкой // В. Г. Савин / Акуст. журн. –1992. – т.38, № 1 – с. 144 – 149.
5. Дідковський В. С. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). Навч. посібник. // В. С. Дідковський, А. А. Лейко, В. Г. Савин / – Кіровоград: УМЕКС.-ЛТД. 2006. – 448с.
6. Савин В. Г. Нестационарная гидроэлектроупругость сферических пьезоэлектрических преобразователей. Монография: // В. Г. Савин, А. В. Збруцкий, И. О. Моргун/ К.: НТУУ «КПИ», 2013.–244с.

УДК 539.595

**В. В. Губська**

## **ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ КОНІЧНОГО РЕЗЕРВУАРУ І РІДИНИ З ВІЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ ПІД ДІЄЮ ПЕРИОДИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

### **Вступ**

Для багатьох видів інженерних систем, пов'язаних із транспортуванням рідких вантажів, постає проблема динаміки, викликана коливаннями рідини з вільною поверхнею. Прикладом таких інженерних конструкцій є баки з рідиною у складі космічних апаратів з рідинним двигуном, літаків, гелікоптерів, танкерів та інших транспортних засобів. Проблема коливань конструкцій з рідиною викликає інтерес щодо впливу коливань рідкого палива на льотно-технічні характеристики реактивних