

УДК 534.3

А.Г. Лейко, д-р. тех. наук, **А.И. Нижник**, **Я.И. Старовойт**

Государственное предприятие «Киевский научно-исследовательский институт гидроприборов», ул. Сурикова, 3, г. Киев, 03035, Украина.

Акустические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с продольным и поперечным пьезоэффектами

Проведен численный анализ свойств звуковых полей, формируемых цилиндрическими пьезокерамическими излучателями силовой и компенсированной конструкции. Рассмотрены различные составы пьезокерамики и различные схемы построения колебательных систем, позволяющие реализовать в излучателе продольный либо поперечный пьезоэффекты. Изучено влияние на создаваемое звуковое поле изменения геометрических размеров конструкции излучателя. Сопоставительный анализ частотных зависимостей звуковых полей позволил установить ряд тонких эффектов в их формировании, зависящих как от типа конструктивного исполнения, так и от вида используемого пьезоэффекта и состава используемой пьезокерамики. Библиограф. 3, рис. 9, табл. 1.

Ключевые слова: звуковые поля, цилиндрический пьезокерамический излучатель, продольный и поперечный пьезоэффект, силовая и компенсированная конструкция.

Введение

В практической гидроакустике широкое применение нашли круговые цилиндрические пьезокерамические излучатели. При их построении используют либо продольный, либо поперечный пьезоэффекты, а конструктивное исполнение может быть либо силовым, либо компенсированным [1, 2]. При этом обоснование выбора при выполнении проектных работ того или иного варианта носит в основном качественный характер, а некоторые количественные оценки проводятся приближенно, с использованием метода эквивалентных электромеханических схем [1].

С публикацией работы [3] появилась возможность в строгой постановке с единых методических позиций провести сопоставление

электроакустических характеристик круговых цилиндрических пьезокерамических излучателей в зависимости от вида использованного пьезоэффекта и характера конструктивного исполнения излучателя и получить таким образом четко аргументированные обоснования выбора того или иного варианта технической реализации излучателя. Этой цели и посвящена данная работа.

Результаты исследований

С использованием аналитических соотношений, полученных в работе [3], проведем сравнительный анализ зависимостей амплитуд давления во внутренней полости и вне излучателя от частоты излучаемого сигнала для цилиндрических излучателей силовой и компенсированной конструкций, построенных с использованием продольного и поперечного пьезоэффектов.

Расчеты численных характеристик звуковых полей проводились для следующих параметров излучателей:

- для трех составов пьезокерамики: ЦТБС-3, ЦТС-19, ТБК-3. При этом срединный радиус $r_0 = 0.068$ м; толщина стенки $h = 0.008$ м;
- для трех толщин стенки излучателя h : 8 мм, 10 мм, 12 мм. Условия: пьезокерамика марки ЦТБС-3; срединный радиус $r_0 = 0.068$ м;
- для трех радиусов срединной поверхности r_0 : 68 мм, 100 мм, 120 мм. Условия: пьезокерамика состава ЦТБС-3; толщина стенки $h = 0.008$ м;
- для электрического напряжения, возбуждающего излучатель, равного 200 В.

Выбранные для расчетов параметры указанных составов пьезокерамики приведены в табл. 1 [1].

Таблица 1.

Параметр	Состав керамики		
	ЦТБС-3	ЦТС-19	ТБК-3
Плотность, $\rho_k, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	7210	7740	5400
Пьезомодуль, $\frac{d_{31}}{d_{33}} \cdot 10^{-12}, \frac{\text{Кл}}{\text{Н}}$	134/286	125/304	49/121
Модуль упругости, $\frac{C_{11}^E}{C_{33}^E} \cdot 10^{10}, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	15,1/13,6	10,9/9,3	15,7/15,3

Вопрос выбора количества призм, учитываемых в дальнейшем при выполнении расчетов, необходимо выделить особо. Как известно [1], для реализации в цилиндрическом излучателе поперечного пьезоэффекта, образующие излучатель кольцевые пьезокерамические элементы должны выполняться в виде сплошных конструкций и иметь радиальную поляризацию. Для реализации продольного пьезоэффекта кольцевые пьезокерамические элементы должны иметь вид секционированных конструкций, что достигается набором их из отдельных пьезокерамических призм, жестко склеенных между собой для достижения монолитности, и иметь окружную поляризацию. Естественно возникает вопрос о количестве призм, из которых нужно создавать секционированные пьезокерамиче-

ские кольца. Ответ на него дают результаты исследований, представленные на рис. 1. Их анализ показывает, что при выборе типа пьезоэффекта при проектировании цилиндрического излучателя, при прочих равных условиях, этот выбор определяется количеством призм, из которых предполагается образовывать кольцевые пьезокерамические элементы излучателя. Так, для пьезокерамики состава ЦТБС-3 при радиусе пьезокерамического кольца $r_0 = 0,068 \text{ м}$ использование продольного пьезоэффекта становится эффективным, если минимальное количество призм в кольце составляет 28 шт. В целом, это минимальное количество призм зависит как от состава пьезокерамики, так и от диаметра и толщины проектируемого излучателя.

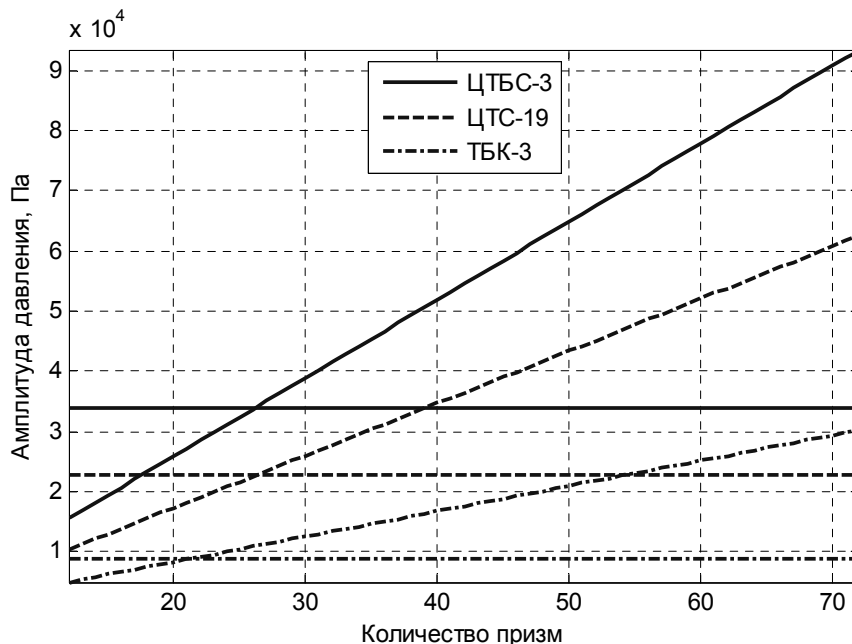


Рис. 1. Графики зависимости амплитуды давления на поверхности излучателя при продольном и поперечном (горизонтальные линии) пьезоэффектах от количества призм в секционированных кольцах для разных составов пьезокерамики при $r_0 = 0,068 \text{ м}$, $h = 0,008 \text{ м}$.

Физически повышение эффективности излучателя при использовании продольного пьезоэффекта и увеличении количества секций его

пьезокерамических колец объясняется тем, что при одном и том же электрическом напряжении, подаваемом на вход излучателя, увеличение

количества призм в секционированном кольце заданного диаметра приводит к повышению напряженности электрического поля, создаваемого в пьезокерамическом материале излучателя. В дальнейшем при расчетах будем принимать количество призм $n = 48$.

Для излучателей силовой конструкции с продольным и поперечным пьезоэффектами результаты расчетов звукового поля представлены на рис. 2-4. Здесь и далее обозначения а и б соответствуют данные с продольным (а) и поперечным (б) пьезоэффектами. Анализ приведенных результатов показывает, что использование продольного пьезоэффекта существ-

венно повышает эффективность излучателя по сравнению со случаем поперечного пьезоэффекта. При этом некоторое изменение претерпевает и частота максимального излучения, которая в свою очередь существенно зависит от состава используемой пьезокерамики. Последнее объясняется различием в значениях модулей упругости для разных составов пьезокерамики (табл. 1).

Особый интерес вызывает появление в частотной характеристике на отдельных частотах локальных резонансов, в виде всплесков амплитуд давления (рис. 2).

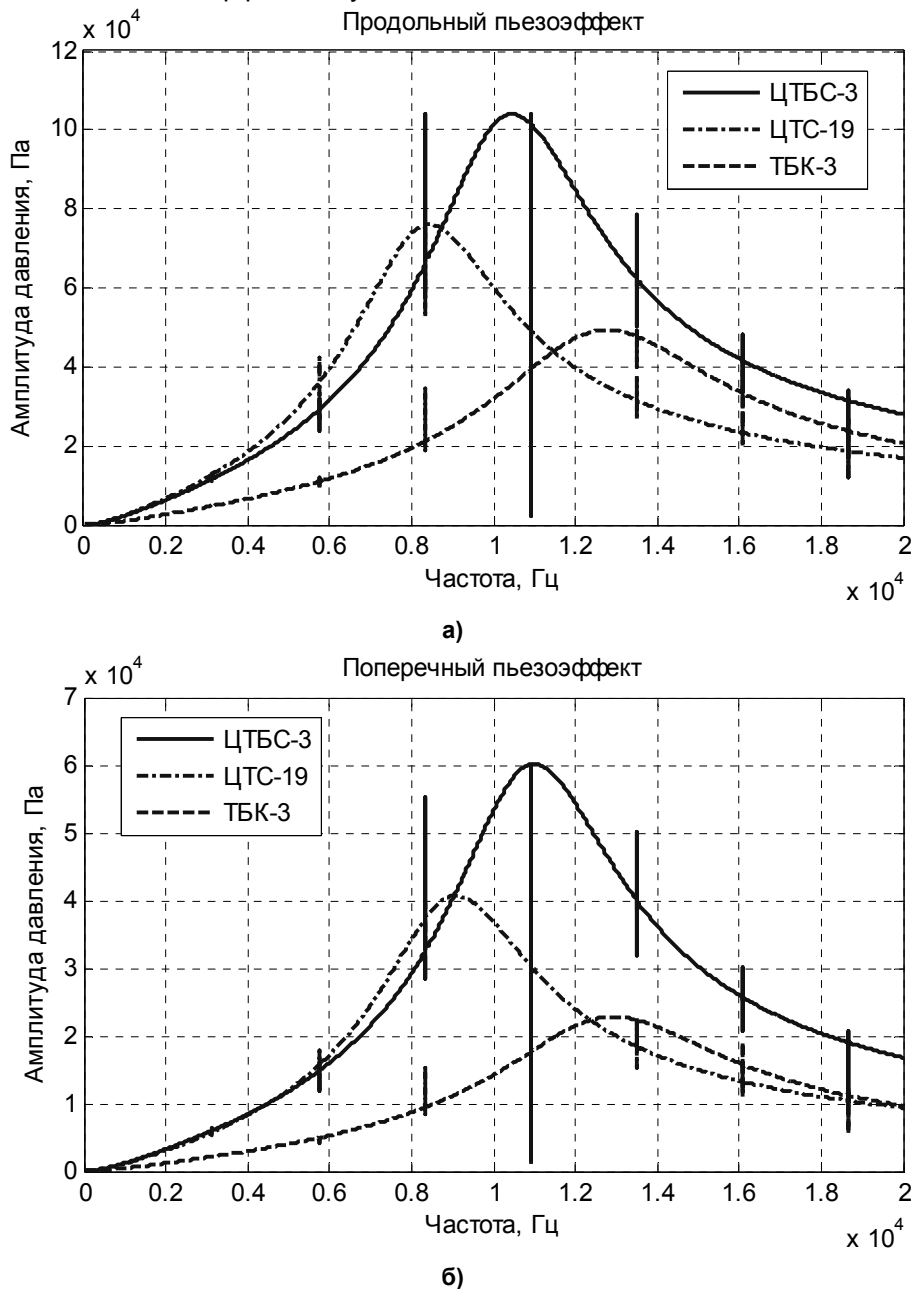


Рис. 2. Графики зависимости амплитуды звукового давления на внешней поверхности излучателя силовой конструкции от частоты для разных составов пьезокерамики при $r_0 = 0,068$ м, $h = 0,008$ м.

Обращает на себя внимание то, что частоты этих локальных резонансов не связаны с составом пьезокерамики и типом пьезоэффекта, используемых в излучателе, а зависят только от диаметра $2r_0$ излучателя. При этом полосы частот, в которых проявляются эти локальные

резонансы, чрезвычайно узки (рис. 3). Следует отметить, что в литературе какие-либо данные по установленным выше особенностям частотной характеристики давления излучателей силовой конструкции не описывались.

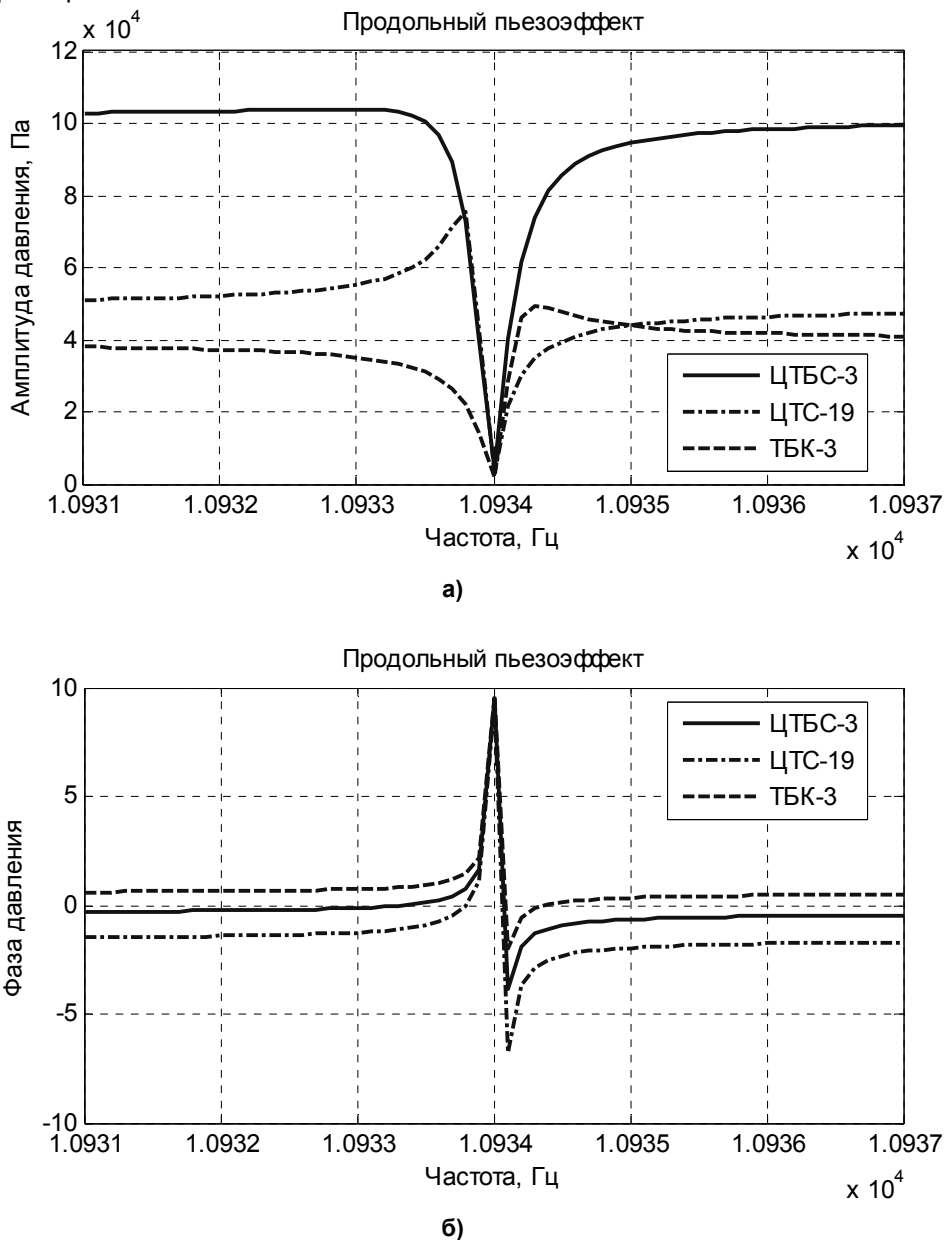


Рис. 3. Графики зависимости амплитуды (а) и фазы (б) звукового давления излучателя силовой конструкции на его поверхности от частоты в области одного из локальных резонансов излучателя

Поиск физических причин появления провалов в указанной частотной характеристике позволил установить, что такими причинами являются резонансы воздушной полости излучателя силовой конструкции (рис. 4,а). Действительно, сравнение между собой амплитуд давления звукового поля на внешней (рис. 2) и

внутренней (рис. 4,а) поверхностях пьезокерамической оболочки излучателя показывает, что, во-первых, частоты резонансных явлений полностью совпадают, и, во-вторых, амплитуды давлений на этих частотах в воздухе даже выше, чем в воде.

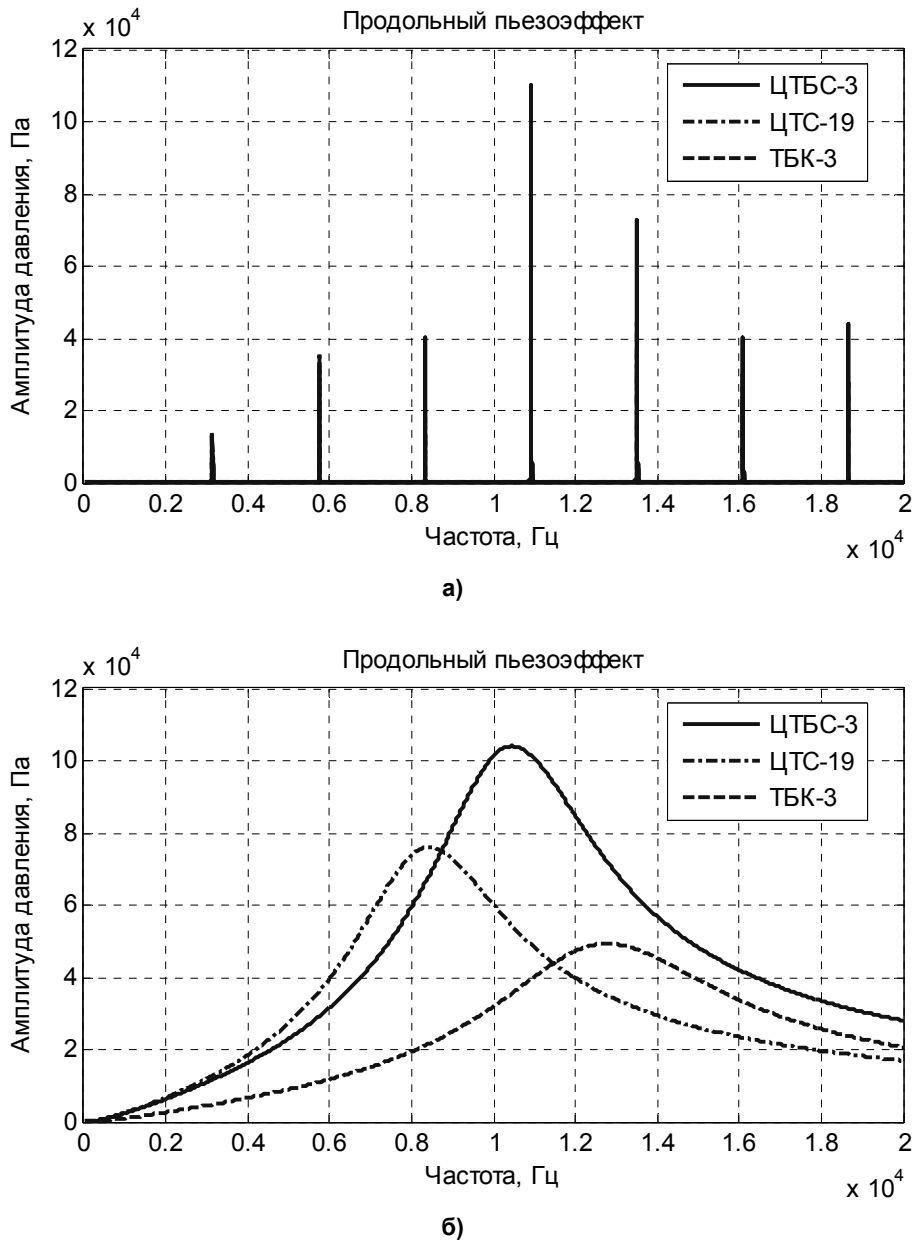


Рис. 4. Графики частотной зависимости амплитуды давления на внутренней (а) и на внешней поверхности излучателя (б) при $r_0 = 0,068$ м, $h = 0,008$ м. (а) - вода/воздух; б) - вода/вакуум)

Еще одним подтверждением правильности установленных причин являются данные, приведенные на рис. 4,б. Они получены для случая, когда внутренняя полость излучателя силовой конструкции полностью вакуумирована, то есть импеданс излучения Z_2 во внутреннюю полость [1] равен нулю. Как видим, в этом случае частотная характеристика давления не имеет никаких дополнительных резонансов.

Для излучателей компенсированной конструкции с продольным и поперечным пьезоэффектами результаты расчетов представлены на рис. 5-8. Анализ графиков рис. 5 и сопоставление их с графиками на рис. 2-4 показывает, что

переход от силовой к компенсированной конструкции излучателя, сопровождаемый увеличением плотности и скорости звука в среде, заполняющей внутреннюю полость излучателя, сопровождается существенными изменениями акустических свойств излучателя. Действительно, в случае вакуумирования внутренней полости излучателя силовой конструкции частотная характеристика излучателя представляет собой (рис. 4, б) пологую кривую с четко выраженным резонансом, соответствующим резонансу продольных колебаний по средней окружности пьезокерамической оболочки излучателя.

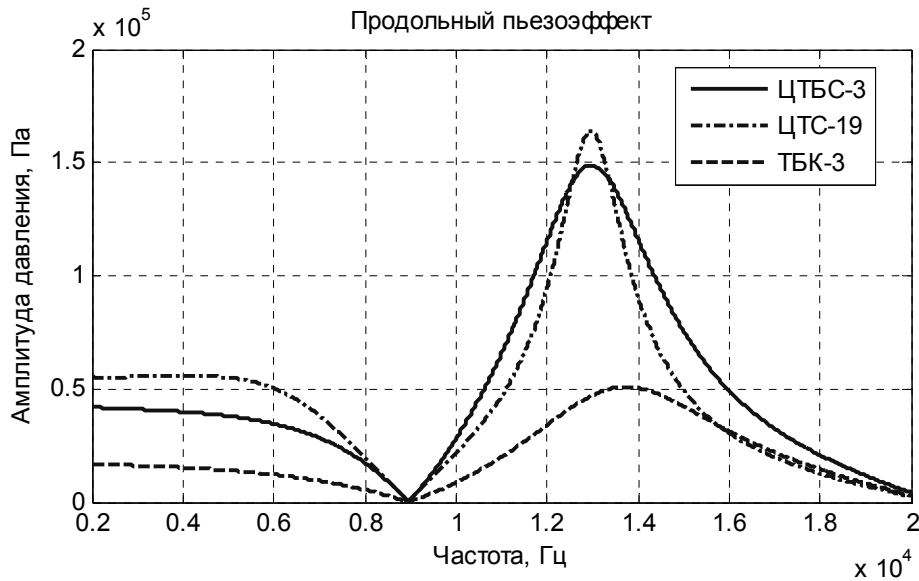


Рис. 5 . Графики частотной зависимости амплитуды давления на внутренней поверхности излучателя компенсированной конструкции при $r_0 = 0,068$ м, $h = 0,008$ м, $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$

Заполнение внутренней полости излучателя воздухом при нормальном атмосферном давлении обуславливает появление в этой полости упругой среды и, соответственно, звукового поля в виде резонансов (рис. 4, а), всплесков на отдельных частотах.

Учитывая малые потери звуковой энергии в воздушной среде, эти резонансы характеризуются чрезвычайной узкополосностью и проявляются в звуковом поле излучателя во внешней жидкой среде в виде всплесков амплитуды давления на частотах этих резонансов (рис. 2 и 3). Заполнение внутренней полости излучателя жидкой средой, возникающее при переходе от излучателя силовой конструкции к излучателю компенсированной конструкции, существенно повышает удельное волновое сопротивление внутренней среды. Возникающее при этом звуковое поле во внутренней полости излучателя характеризуется (рис. 5), во-первых, наличием амплитуд давления во всей частотной области, а не только на отдельных частотах, как это имело место для излучателя силовой конструкции, и, во-вторых, наличием областей резонансных частот. Эти области, в отличие от излучателей силовой конструкции, имеют значительную частотную протяженность. Естественно, такое поведение звукового поля во внутрен-

ней области излучателя находит свое отражение и во внешней области (рис. 6). Анализ графиков рис. 6 показывает, что увеличение $\rho_2 c_2$ внутренней среды сопровождается существенным расширением резонансной области излу-

чения $\left(\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} = 0,5; 0,8 \right)$ и последующим превращением излучателя в многорезонансный преобразователь ($\rho_2 c_2 = \rho_1 c_1$). Такие частотные особенности акустических свойств излучателя имеют место при построении его с использованием как продольного, так и поперечного пьезоэффектов. При этом, как и в случае с излучателем силовой конструкции, эффективность излучателя, образованного из цельных пьезокерамических колец практически вдвое меньше эффективности излучателя на основе секционированных колец.

Изменение состава пьезокерамики (рис. 7) приводит к изменению характера поведения частотных зависимостей звукового поля. При этом для излучателей, построенных с использованием поперечного пьезоэффекта, характерными являются не только снижение эффективности излучателя, но и уменьшение диапазона частот его эффективного излучения.

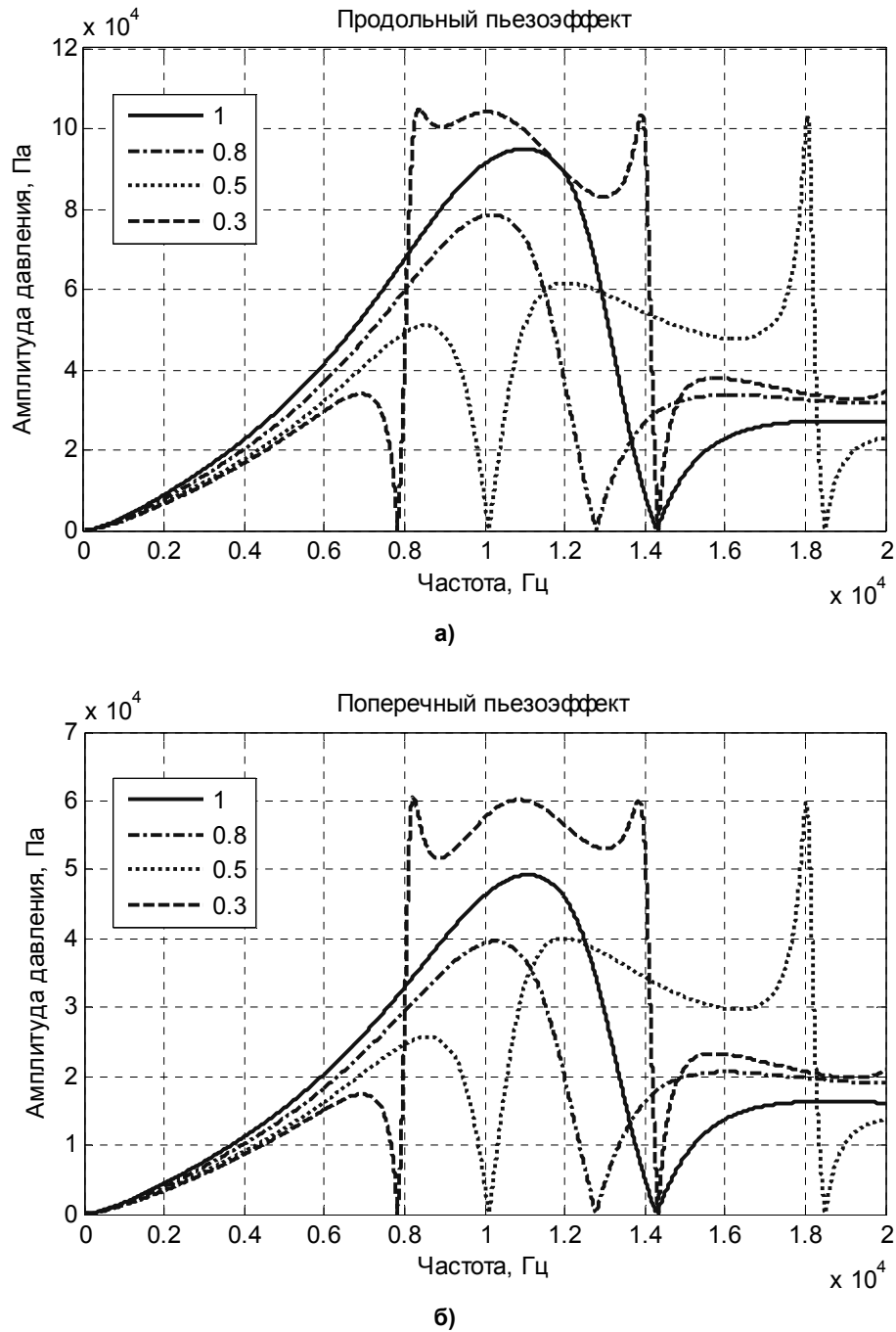


Рис. 6. Графики зависимости амплитуды звукового давления излучателя компенсированной конструкции на его внешней поверхности от частоты при заполнении излучателя жидкостями с относительным разным удельным волновым сопротивлением $\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}$ при $r_0 = 0,068$ м, $h = 0,008$ м. и пьезокерамике состава ЦТБС-3

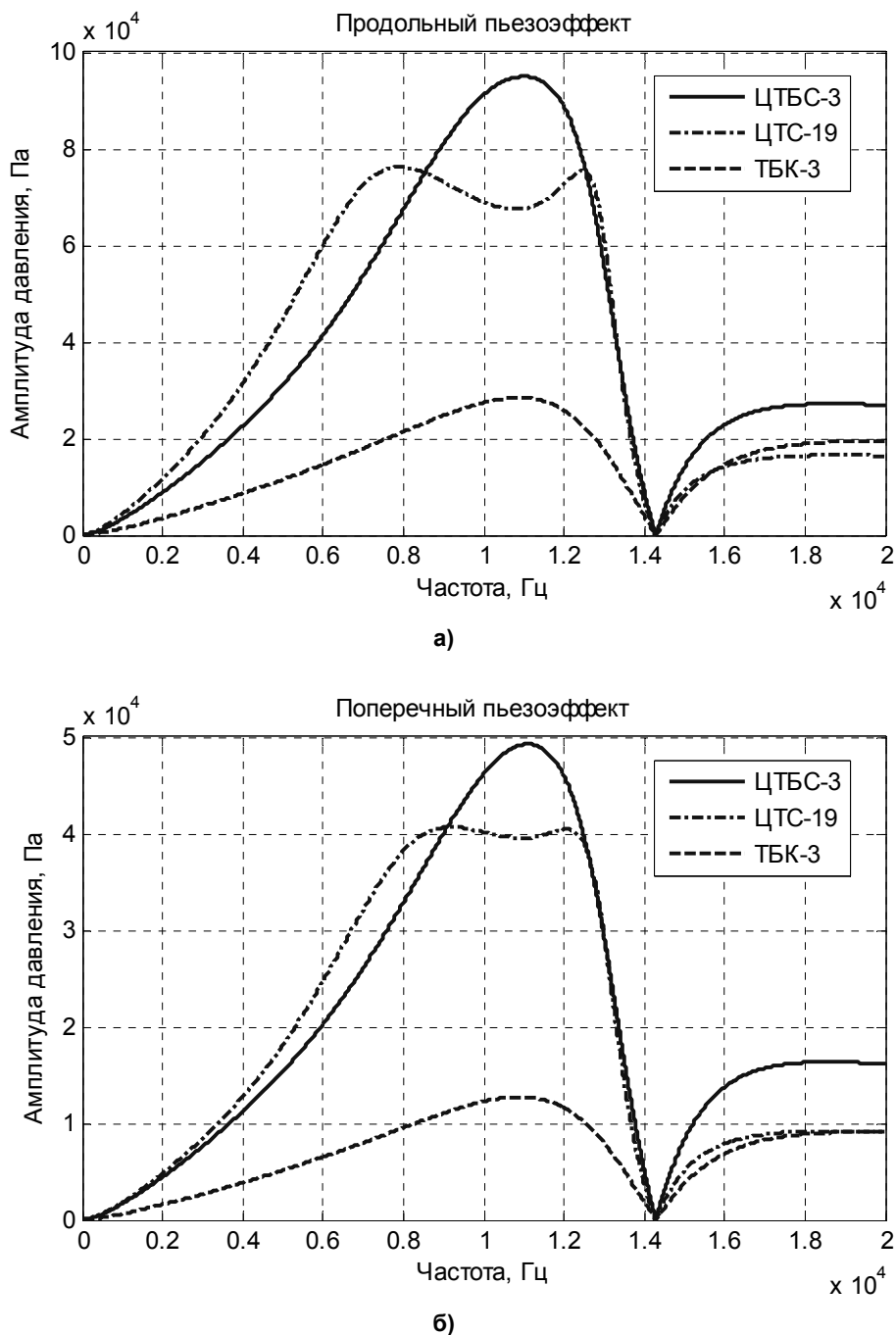


Рис. 7. Графики зависимости амплитуды звукового давления излучателя компенсированной конструкции на его внешней поверхности от частоты для разных составов пьезокерамики при $r_0 = 0,068$ м, $h = 0,008$ м, $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$

Изменение толщины пьезокерамической оболочки излучателя (рис. 8) для излучателей на основе продольного пьезоэффекта сопровождается существенным повышением их эффек-

тивности и появлением возможностей многорезонансного излучения. Для излучателей на основе поперечного пьезоэффекта таких эффектов не наблюдается.

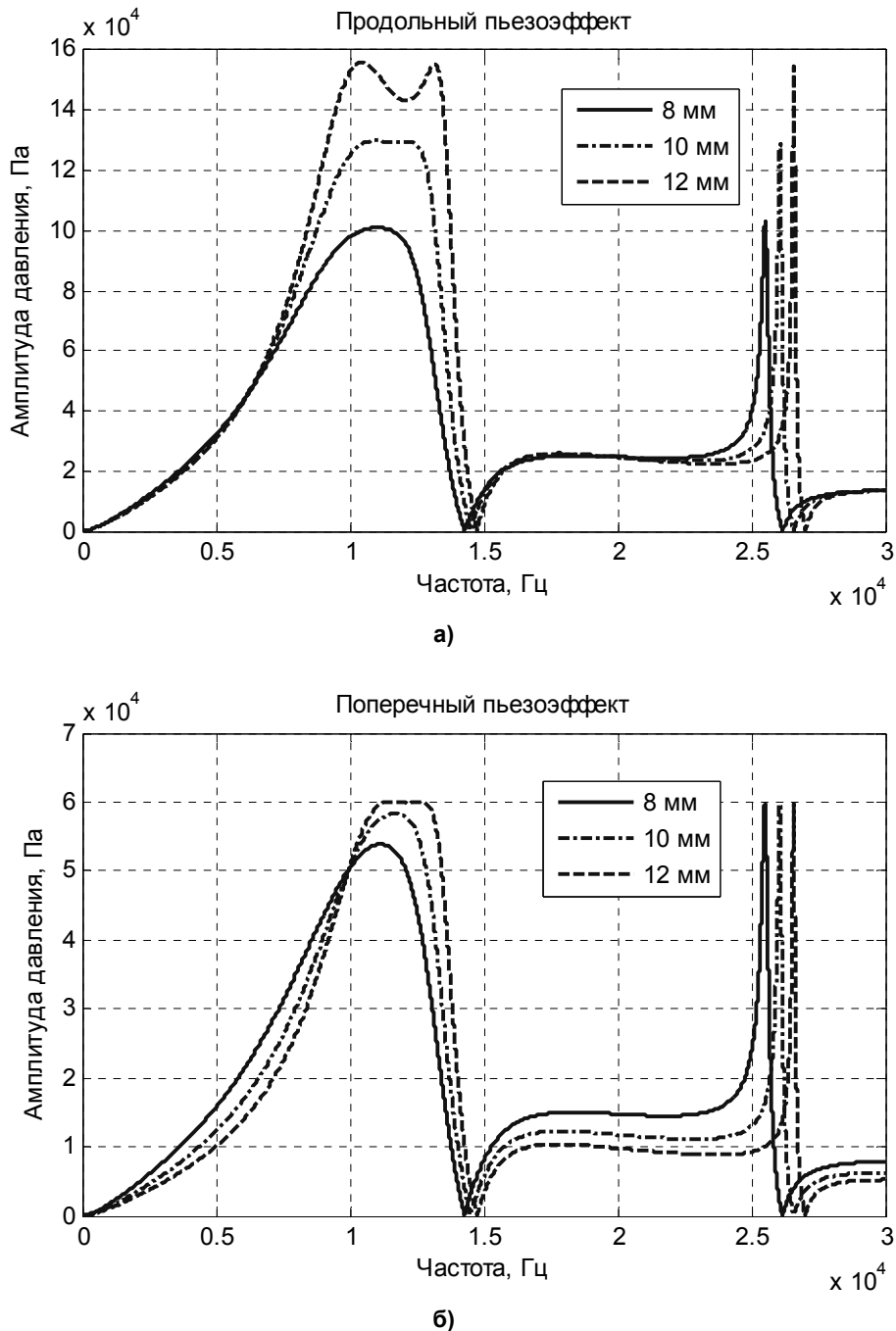


Рис. 8. Графики зависимости амплитуды звукового давления излучателя компенсированной конструкции на его внешней поверхности от частоты для разных толщин пьезокерамической оболочки состава ЦТБС-3 при $r_0 = 0,068$ м, $h = 0,008$ м, $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$

Такое различие в наведенных частотных характеристиках звукового поля можно объяснить тем, что при одной и той же величине возбуждающего напряжения излучателя, построенные с использованием сплошных пьезокерамических колец, при увеличении толщины колец будут иметь меньшую величину напряженности

электрического поля, создаваемого в пьезо керамике излучателя.

Такая же физическая ситуация, но только с излучателями, построенными на основе секционированных пьезо керамических колец, имеет место при увеличении радиуса излучения и сохранении неизменным количества призм в кольцах. Это видно из рис. 9.

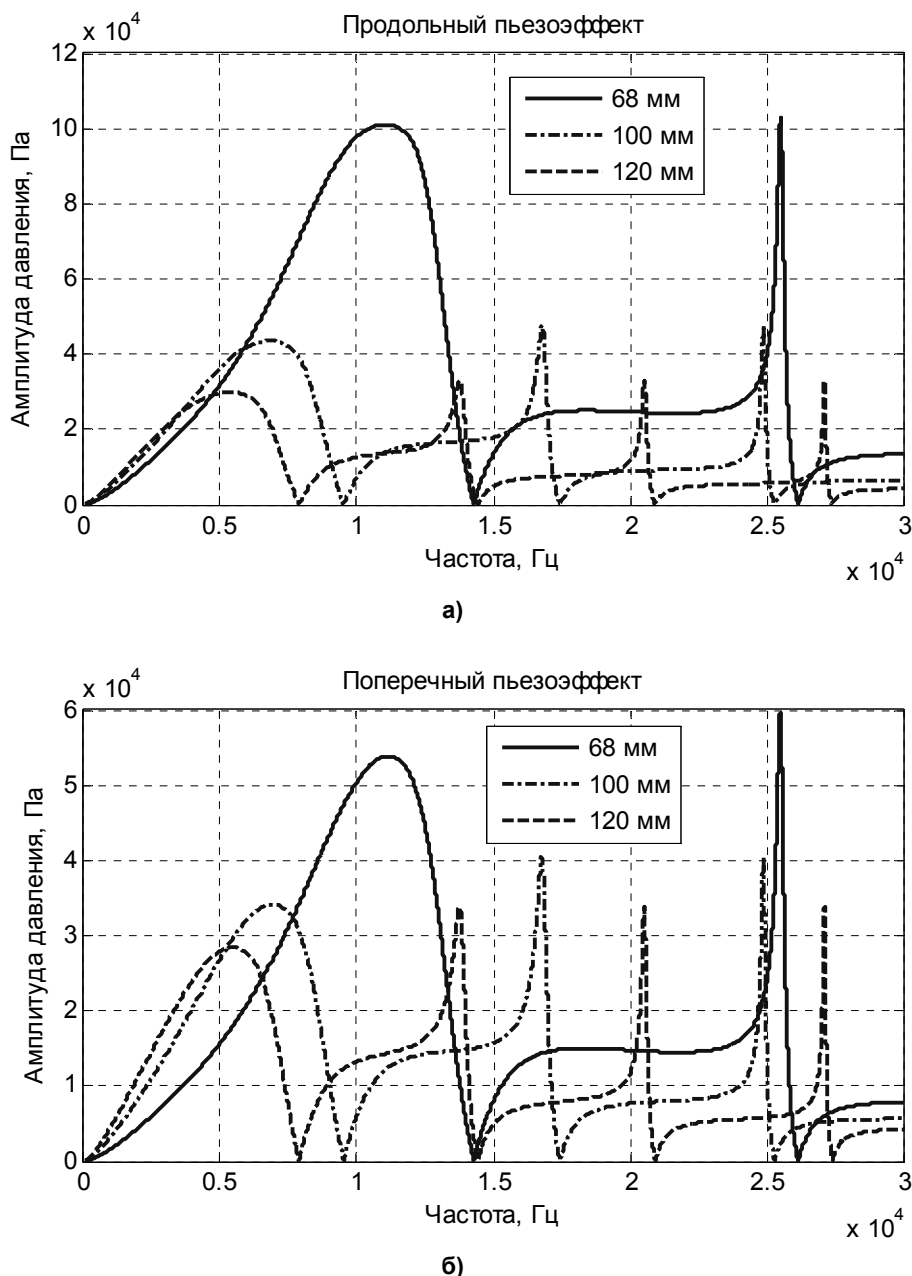


Рис. 9. Графики зависимости амплитуды звукового давления излучателя компенсированной конструкции на его внешней поверхности от частоты для разных радиусов пьезокерамической оболочки состава ЦТБС-3 при $r_0 = 0.068$ м, $h = 0.008$ м, $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$

Действительно, при использовании продольного пьезоэффекта увеличение радиуса излучателя при неизменных величинах питающего напряжения и количества призм сопровождается существенным изменением эффективности излучателей. Более того, при больших значениях радиусов излучатели на основе использования продольного и поперечного пьезоэффектов становятся сопоставимыми по эффективности, имея при этом существенно отличающиеся между собой технологические сложности при их изготовлении.

Выводы

Проведен сопоставительный анализ акустических свойств цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкций, при построении которых используется продольный или поперечный пьезоэффекты. Показано, что излучатели на основе продольного пьезоэффекта при одном и том же составе пьезокерамики отличаются существенно

большой эффективностью. Определены случаи, где эта закономерность нарушается.

Установлено, что в частотной характеристике излучателей силовой конструкции в виде плавной резонансной кривой при вакуумировании внутренней полости излучателей возникают узкополосные резонансы при заполнении этой полости газом. Величины резонансных частот и их частотная протяженность определяются размерами внутренней полости и величиной статического давления в заполняющем ее газе. Переход к излучателям компенсированной конструкции, связанный с заполнением их внутренней полости жидкостью, сопровождается существенным расширением резонансной области и даже превращением излучателей в многорезонансные преобразователи. Характер проявления установленных закономерностей определяется величиной соотношения волновых сопротивлений сред внутри и снаружи преобразователя.

Список использованных источников

1. Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). Навчальний посібник. – Кіровоград: "Імекс-ЛТД", 2006. – 448 с.
2. Дідковський В. С., Порошин С. М., Лейко О. Г., Лейко А. О., Дрозденко О.І. Конструювання електроакустичних приладів і систем для мультимедійних акустичних технологій. – Харків: 2013 р. – 390 с.
3. Лейко А.Г., Нижник А.И., Старовойт Я.И. Звуковые поля пьезокерамических излучателей с различным пьезоэффектом// Электроника и связь. - 2013. - №5 – С.50-55.

Поступила в редакцию 21 декабря 2013 г.

УДК 534.3

О.Г. Лейко, д-р. тех. наук, **О.І. Нижник**, **Я.І. Старовойт**

Державне підприємство «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів»,
вул. Сурикова, 3, м. Київ, 03035, Україна.

Акустичні властивості циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової і компенсованої конструкції з поздовжнім і поперечним п'єзоефектом

Проведено чисельний аналіз властивостей звукових полів, формованих циліндричними п'єзокерамічними випромінювачами силовий і компенсованої конструкції. Розглянуто різні склади п'єзокераміки і різні схеми побудови коливальних систем, що дозволяють реалізувати у випромінювачі поздовжній або поперечний п'єзоефекти. Вивчено вплив на створюване звукове поле зміни геометричних розмірів конструкції випромінювача. Порівняльний аналіз частотних залежностей звукових полів дозволив встановити ряд тонких ефектів у їх формуванні, що залежать як від типу конструктивного виконання, так і від виду використовуваного п'єзоефекта і складу використовуваної пьезокераміки. Бібл. 3, рис. 9, табл. 1.

Ключові слова: звукові поля, циліндричний п'єзокерамічний перетворювач, подовжній і поперечний п'єзоефект, силова і компенсована конструкція.

UDC 534.3

A.G. Leiko, Dr.Sc., A.I. Nyzhnyk, Y.I. Starovoyt

State Enterprise Kiyv Scientific Research Institute of Hydrodevices,
st. Surikova, 3, Kiev, 03035, Ukraine.

Acoustic properties of cylindrical piezoceramic emitters with power and compensated design with longitudinal and transverse piezoelectric effect

The numerical analysis of the properties of sound fields, generated by cylindrical piezoceramic transducers, power and compensated design has been done. Different compounds of piezoceramics and various schemes of constructing oscillation systems has been analyzed, allowing to implement in the transducer longitudinal or transverse piezoeffect. The influence in the sound field made by the changes in the geometric form of the transducer has been discovered. Comparative analysis of the frequency dependence of the sound fields allowed us to establish a number of subtle effects in their formation, depending both on the type of construction, and the kind of the piezoelectric effect and compound of piezoceramics used. Reference 3, figures 9, table 1.

Keywords: *sound fields, cylindrical piezoelectric transducer, the longitudinal and transverse piezoelectric effect, power and compensated design.*

References

1. *Didkovskij V.S., Lejko O.G., Savin V.G. (2006), "Electroacoustic piezoceramic transducers (calculation, design, construction). Education manual". Kirovograd, "Imex-LTD". P.448 (Ukr)*
2. *Didkovskij V. S., Poroshin S. M., Lejko O. G., Lejko A. O., Drozdenko O.I. (2013) "Construction of electroacoustic instruments and systems for multimedia acoustic technology". Kharkov. P. 390. (Ukr)*
3. *Leiko A.G., Nyzhnyk A.I., Starovoyt Y.I. (2014), "Sound fields of piezoceramic emitters with different piezoelectric effect". Electronics and Communication. №4. Pp. 50-55. (Rus)*