

Исследование длительности акустического сигнала на выходе излучателя для дистанционного зондирования водной среды

Б.Ч. И., Р.С. Коновалов, С.И. Коновалов, А.Г. Кузьменко, В.М. Цаплив

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 197376, ул. Проф. Попова 5, Санкт-Петербург, Россия, e-mail.: sikonovalov.eut@gmail.com,
Tel: +7 (812) 234-37-26, Fax: +7 (812) 234-37-26

ООО «Сименс», 115184, ул. Большая Татарская, д. 9, Москва, Россия.

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, Московский пр., д. 9, Санкт-Петербург, Россия.

Для решения широкого класса задач, связанных с изучением Мирового океана, в качестве излучателей и приемников акустических сигналов применяются пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). Обеспечение возможности работы ПЭП в режиме излучения короткого зондирующего импульса позволяет повысить разрешающую способность аппаратуры дистанционного зондирования водной среды. Для увеличения глубокowodности ПЭП (с целью предотвращения механического разрушения) может применяться заполнение внутренней полости ПЭП различными жидкостями. Представляют интерес исследования возможности получения на выходе ПЭП этого типа короткого зондирующего сигнала. В работе рассмотрен импульсный режим работы ненаправленного тонкостенного сферического излучателя, возбуждаемого коротким электрическим сигналом. Исследования основаны на применении метода схем-аналогов ПЭП и спектрального метода Фурье. Выполнены оценки длительностей и амплитуд зондирующих импульсов, излучаемых ПЭП с заполнением и без него. Полученные результаты могут быть применены при проектировании аппаратуры для подводных исследований.

To solve a wide class of problems associated with the study of the oceans, piezoelectric transducers (PET) are used as emitters and receivers of acoustic signals. Providing the possibility of operation of the probe in the radiation mode of a short probe pulse allows you to increase the resolution of the remote sensing equipment of the aquatic environment. To increase the depth of the probe (to prevent mechanical destruction), filling the internal cavity of the probe with various liquids can be used. It is of interest to investigate the possibility of obtaining at the output of the probe of this type of short probe signal. The paper considers the pulsed mode of operation of an omnidirectional thin-walled spherical emitter excited by a short electric signal. The studies are based on the application of the method of analog-to-analog probes and the Fourier spectral method. The durations and amplitudes of the probe pulses emitted by the probe with and without filling are estimated. The results can be applied in the design of equipment for underwater research.

1. Введение

Исследование различных сред, материалов и изделий может осуществляться разнообразными методами, в основу которых положены различные физические принципы. При этом широкое распространение получили акустические методы изучения сплошности физических сред. Стоит заметить, что несмотря на многообразие применяемых для этих целей акустических методов, их характерной особенностью является необходимость использования в составе контрольно-измерительной аппаратуры конструктивного элемента, в задачу которого входит излучение и прием акустических волн, с помощью которых осуществляется зондирование исследуемой среды. Таким элементом является электроакустический преобразователь. В настоящее время наиболее часто применяются пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). Качество исследований во многом определяется свойствами ПЭП. Так, например, способность пьезопреобразователя излучать короткие акустические зондирующие сигналы позволяет улучшать важнейшие характеристики систем, предназначенных для контроля изучаемых сред (мерт-

вая зона, разрешающая способность, точность определения координат объектов, подлежащих обнаружению и классификации). При этом под коротким зондирующим сигналом следует понимать такие акустические импульсы, длительность которых не превосходит всего лишь нескольких полупериодов высокой частоты. В дальнейшем под термином «импульсный режим работы» преобразователей будем понимать работу ПЭП именно в этом смысле.

Непрерывный режим работы пьезопреобразователей изучен в настоящее время очень подробно. Описанию теории их работы, проектирования, технологии изготовления и измерения параметров посвящено огромное количество работ. В качестве примера можно привести хотя бы некоторые из них [1–8]. Импульсный режим работы ПЭП, несмотря на значительное количество публикаций, изучен в меньшей степени. Библиографические ссылки на работы, касающиеся исследования данных вопросов, представлены в [2, 9–11].

В некоторых предшествующих публикациях авторами были проведены исследования импульсного режима работы пьезоизлучателей различных форм при нагрузке на различные среды. При этом основное внимание уделялось вопросам изучения возможности снижения длительности зондирующих сигналов, излучаемых преобразователями. Так, например, в [12, 13] эти вопросы рассмотрены в применении к пластинчатому ПЭП, предназначенным для работы на твердые среды. Работа [14] посвящена исследованию влияния корректирующей цепи на длительность излучаемого плоским преобразователем сигнала. Импульсный режим работы гидроакустического цилиндрического преобразователя с внутренним заполнением и подключенной к его электрической стороне электрической корректирующей цепью рассмотрен в [15]. Представляет интерес продолжение начатых ранее исследований для преобразователей другой формы. С этой целью в настоящей работе изучен импульсный режим работы сферического преобразователя для глубоководных исследований. Внутреннее пространство сферы заполнено жидким материалом с целью увеличения механической прочности ПЭП при погружении на значительные глубины. Такие ПЭП могут применяться в случаях, требующих создания ненаправленного излучения. Их использование возможно также в системах, предполагающих наличие рефлекторов (например, параболоидов вращения), в фокусе которых может располагаться сферический излучатель.

2. Аналитическое решение задачи

Рассмотрим сферический пьезокерамический излучатель с внутренним жидкостным заполнением (вода, масло, глицерин и др.), представленный на рис. 1. Будем полагать в качестве акустической нагрузки водную среду. В качестве активного материала выберем пьезокерамику ЦТСНВ-1. Пусть $U(t)$ – импульс электрического напряжения, подаваемый на преобразователь для возбуждения его колебаний. Введем обозначения: $R_{\text{ср}}$ – средний радиус сферы, δ – толщина ее стенки, $\alpha = \delta/R_{\text{ср}}$ – относительная толщина стенки. Решение задачи должно подразумевать осуществление оценок длительностей и амплитуд зондирующих акустических сигналов, излучаемых рассматриваемым сферическим преобразователем в окружающую среду.

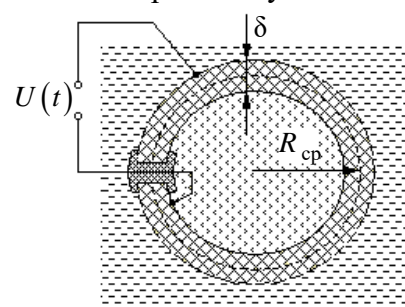


Рис. 1. Схема задачи.

Будем предполагать, что поляризация описанной выше сферы является радиальной. В этом случае пьезокерамическая оболочка будет совершать радиальные колебания, симметричные относительно ее центра. При таком подходе задачу можно рассматривать как одномерную, где существует только лишь зависимость от волнового аргумента

kR (k – волновое число): $kR = \omega/c$, ω – круговая частота, c – скорость звука в конкретно рассматриваемой среде. Будем присваивать величинам, относящимся к внутренней среде (материал заполнения) индекс 1, а величинам, относящимся к внешней – индекс 2. Тогда, считая зависимость от времени в форме $e^{j\omega t}$, в соответствии с [16], удельный импеданс излучения $z_S^{(1)}$ внутрь сферы будет иметь вид;

$$z_S^{(1)} = -j\rho_1 c_1 j_0(k_1 R_{\text{сф}}) / j_1(k_1 R_{\text{сф}}),$$

где $j_0(k_1 R_{\text{сф}})$ и $j_1(k_1 R_{\text{сф}})$ представляют собой сферические функции Бесселя нулевого и первого порядков от волнового аргумента ($k_1 R_{\text{сф}}$).

Они могут быть сведены к степенным функциям:

$$j_0(z) = \frac{\sin z}{z}; \quad j_1(z) = \frac{\sin z}{z^2} - \frac{\cos z}{z}.$$

Удельный импеданс излучения во внешнюю $z_S^{(2)}$ среду может быть записан следующим образом:

$$z_S^{(2)} = \rho_2 c_2 \frac{(k_2 R_{\text{сф}})^2 + j(k_2 R_{\text{сф}})}{1 + (k_2 R_{\text{сф}})^2}.$$

Если исходить из предположения о том, что рассматриваемая сфера является тонкостенной, т.е. справедливо соотношение $\alpha \ll 1$, то можно воспользоваться известной эквивалентной схемой такого пьезопреобразователя, представляющей собой схему с сосредоточенными параметрами. Ее вид изображен на рис. 2.

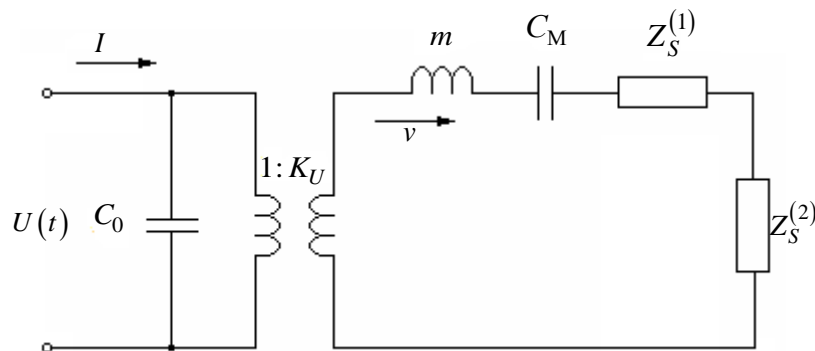


Рис. 2. Эквивалентная схема ПЭП с сосредоточенными параметрами.

Целесообразно привести параметры представленной эквивалентной схемы.

- **Эквивалентная масса пьезокерамики:**

$m = \rho_k S \delta$, где ρ_k и S – плотность пьезокерамики и площадь поверхности сферы, соответственно;

- **Эквивалентная механическая гибкость сферы C_M^E :**

при радиальных колебаниях $C_M^E = \frac{1}{4\pi Y_c^E R_{cp}} \cdot \frac{1}{\alpha}$, где $Y_c^E = Y_1^E \cdot \frac{2}{1 + \frac{s_{12}^E}{s_{11}^E}}$ – эффектив-

ный упругий модуль для сферической оболочки; s_{12}^E и s_{11}^E – элементы матрицы гибкостей пьезокерамики при постоянной напряженности электрического поля; $Y_1^E = \frac{1}{s_{11}^E}$ – модуль Юнга;

- **Коэффициент электромеханической трансформации K_U :**

$K_U = 4\pi d_{31} Y_c^E R_{cp}$, где d_{31} – пьезомодуль;

- **Электрическая емкость C_0 механически заторможенного преобразователя:**
 $C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{33}^{u1} S}{R_{cp} \alpha}$, где $\varepsilon_{33}^{u1} = \varepsilon_{33}^\sigma (1 - k_p^2)$; ε_{33}^σ – диэлектрическая проницаемость пьезокерамики при постоянном упругом напряжении; k_p – планарный коэффициент электромеханической связи пьезоматериала; ε_0 – электрическая постоянная;

- **Резонансная частота радиальных колебаний ω_0 :**

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m C_M}} = \frac{c_{1к}^E}{R_{cp}} \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{s_{12}^E}{s_{11}^E}}}, \text{ где } c_{1к}^E = \sqrt{\frac{1}{\rho_k s_{11}^E}};$$

- **Эффективная скорость звука $c_{эф}$:**

$$c_{эф} = c_{1к}^E \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{s_{12}^E}{s_{11}^E}}}.$$

Данное выражение для $c_{эф}$ позволяет выразить условие резонанса следующим образом:

$$\frac{\omega_0}{c_{эф}} R_{cp} = 1.$$

Для решения задачи в наиболее общем виде необходимо ввести безразмерную частоту как отношение текущей частоты к частоте резонансных колебаний $\gamma = \omega / \omega_0$.

Обозначим через b_1 и b_2 отношения величин: $b_1 = c_{эф} / c_{зап}$ и $b_2 = c_{эф} / c_в$ (здесь $c_{зап}$ и $c_в$ – скорости звука в заполняющей сферу жидкости и в водной среде, соответственно). С учетом этого $k_k R_{cp} = \gamma$; $k_1 R_{cp} = \gamma b_1$; $k_2 R_{cp} = \gamma b_2$ ($k_k = \omega / c_{эф}$ – волновое число для керамики).

Тогда с учетом введенных обозначений выражения для импедансов излучения можно переписать следующим образом:

$$Z_S^{(1)}(\gamma) = z_K S \left(-j \cdot \frac{z_{\text{зап}}}{z_K} \cdot \frac{j_0(b_1 \gamma)}{j_1(b_1 \gamma)} \right);$$

$$Z_S^{(2)}(\gamma) = z_K S \left(\frac{z_B}{z_K} \cdot \frac{(\gamma b_2)^2 + j(\gamma b_2)}{1 + (b_2 \gamma)^2} \right),$$

где $z_K = \rho_K c_{\text{эф}}$,

$$z_{\text{зап}} = \rho_{\text{зап}} c_{\text{зап}},$$

$z_B = \rho_B c_B$ – удельные акустические импедансы керамики, вещества заполнения внутренней полости сферы и водной среды, соответственно.

Суммарный импеданс излучения $Z_S(\gamma) = Z_S^{(1)}(\gamma) + Z_S^{(2)}(\gamma)$. Механический импеданс пьезокерамической сферы $Z_{\text{сф}}(\gamma) = j z_K S \alpha \left(\gamma - \frac{1}{\gamma} \right)$. Полное механическое сопротивление сферы с учетом сопротивлений излучения $Z_M(\gamma) = Z_{\text{сф}}(\gamma) + Z_S(\gamma)$.

Выражение для колебательной скорости на поверхности сферы можно представить теперь в следующем виде:

$$v(\gamma) = K_U U / Z_M(\gamma) = \left(\frac{d_{31} Y_c^E}{z_K \delta} \right) \cdot U \cdot \frac{\alpha}{j \alpha \left(\gamma - \frac{1}{\gamma} \right) + \frac{Z_S(\gamma)}{z_K S}}.$$

Полученное для $v(\gamma)$ выражение представляет собой произведение двух сомножителей:

$$1) v_N = \left(\frac{d_{31} Y_c^E}{z_K \delta} \right) \cdot U \text{ – постоянный множитель. Он имеет размерность скорости.}$$

Его можно использовать в качестве нормирующей величины.

$$2) v_1(\gamma) = \frac{\alpha}{j \alpha \left(\gamma - \frac{1}{\gamma} \right) + \frac{Z_S(\gamma)}{z_K S}} \text{ – безразмерный множитель, зависящий от } \gamma \text{ (частотная характеристика ПЭП).}$$

Пусть импульс электрического напряжения, подаваемого преобразователь для его возбуждения, представляет собой половину периода синусоиды на частоте ω_0 , соответствующей радиальному резонансу сферы:

$$U(t) = \begin{cases} U_m \sin \omega_0 t, & 0 \leq t \leq T_0/2 \\ 0, & \text{при } t < 0 \text{ и } t > T_0/2 \end{cases}.$$

Здесь T_0 – период колебаний сферы на частоте ω_0 . Спектральная плотность этого сигнала определяется посредством выполнения прямого преобразования Фурье для $U(t)$:

$$U(\gamma) = \frac{\cos(\gamma\pi/2)}{1-\gamma^2} e^{-j\gamma\pi/2}.$$

Далее стоит перейти к использованию безразмерного времени, которое можно ввести с помощью выражения $T = t/(T_0/2)$ (t – физическое время). Необходимость перехода к использованию безразмерного времени диктуется стремлением к решению задачи в наиболее общем виде, поскольку это позволит в дальнейшем измерять длительности зондирующих импульсов не в единицах реального (физического) времени, а путем оценки числа полупериодов в импульсе на собственной (резонансной) частоте.

Форма излучаемого акустического зондирующего сигнала $v(T)$ может быть определена посредством выполнения обратного преобразования Фурье. Так, с точностью до

$$\text{постоянного множителя } v_1(T) = \text{Re} \int_0^{\infty} U(\gamma) v_1(\gamma) e^{j\gamma\pi T} d\gamma.$$

Далее в работе обсуждаются результаты расчетных исследований, которые были проведены в диапазоне изменения параметра α от 0,01 до 0,2. При α , входящих в указанный интервал, рассматриваемая сфера может считаться тонкостенной.

3. Расчетные результаты

Изучение импульсного режима сферического излучателя первоначально было осуществлено для случая, при котором заполнение внутреннего объема отсутствовало. При этом расчетными исследованиями показано, что для всего диапазона изменения параметра α форма излучаемых в водную среду сигналов оставалась регулярной («правильной»), т.е. сигналы не имели искажений. Это положение может быть проиллюстрировано с помощью рис. 3, на котором показаны формы сигналов, излучаемых исследуемой сферой. На рис. 3а–г по осям абсцисс отложено безразмерное время T , а по осям ординат – нормированное к единице значение колебательной скорости в импульсе v/v_{\max} . Каждому из импульсов, представленных на рис. 3, соответствует свое значение параметра α . Так, например, вариант расчета, соответствующий $\alpha=0,01$, показан на рис. 3а. Варианту $\alpha=0,05$ – на рис. 3б. Вариантам $\alpha=0,1$ и $\alpha=0,2$ соответствуют рис. 3в и 3г, соответственно. Можно видеть, что форма зондирующего импульса не имеет искажений, т.е. остается регулярной во всем диапазоне изменения α .

Наличие жидкостного заполнения внутреннего объема сферы приводит к существенному изменению форм сигналов, излучаемых рассматриваемым ПЭП. Форма зондирующих импульсов утрачивает «правильность», наблюдаются искажения, которые по форме напоминают биения. При осуществлении расчетных оценок форм излучаемых сигналов предполагались два варианта жидкостного заполнения – заливка водой и глицерином. Некоторые результаты расчетной работы приведены на рис. 4. Так, например, формы зондирующих импульсов, показанные на рис. 4а и 4в, соответствуют значению параметра $\alpha=0,02$. Значению $\alpha=0,15$ соответствуют сигналы, представленные на рис. 4б и 4г. При этом к водозаполненному варианту ПЭП относятся рис. 4а и 4б. Заполнению внутренней полости глицерином соответствуют результаты, приведенные на рис. 4в и 4г.

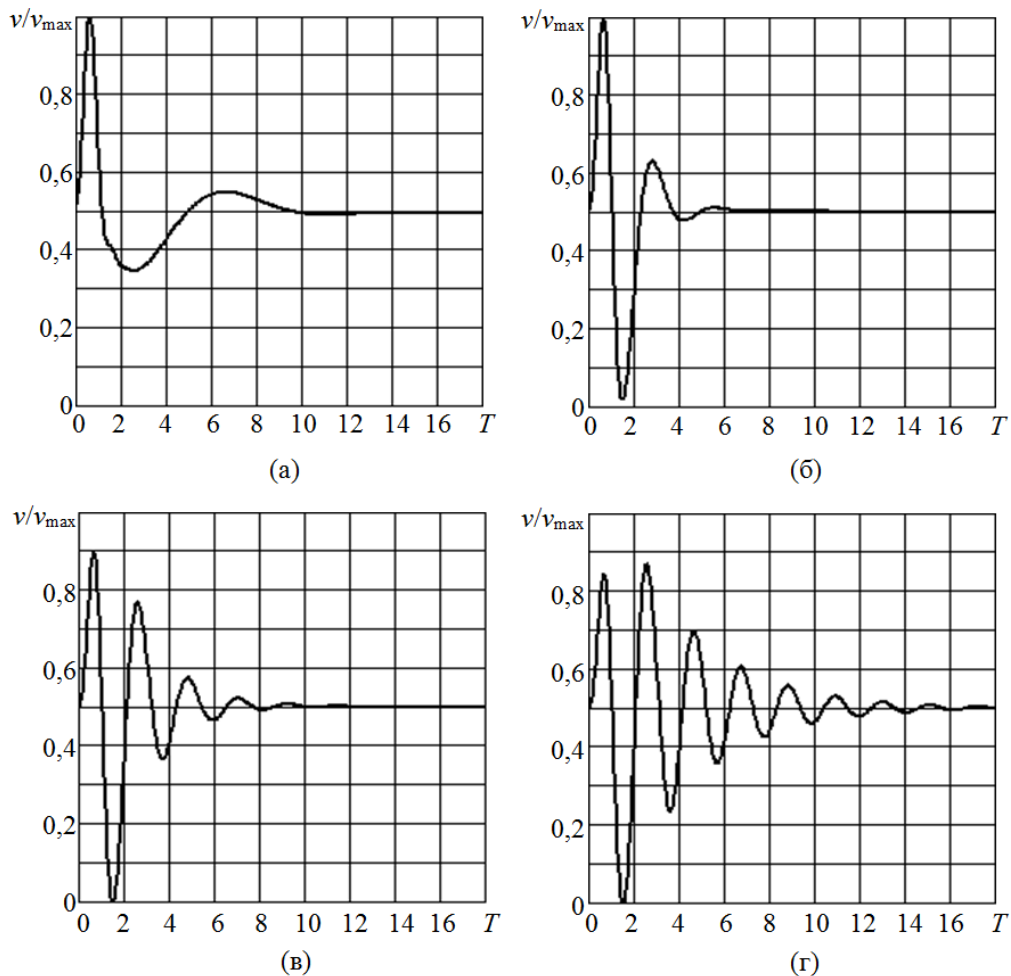


Рис. 3. Формы излучаемых акустических импульсов при отсутствии заполнения внутренней полости ПЭП: а) $\alpha = 0,01$; б) $\alpha = 0,05$; в) $\alpha = 0,1$; г) $\alpha = 0,2$.

Параметры излучаемых зондирующих сигналов подробно представлены в таблице. В частности она содержит оценочные значения амплитуд и длительностей сигналов для α , находящихся в диапазоне от 0,01 до 0,20. Как и в предшествующих работах авторов, длительность импульсов определялась в соответствии с критерием (-20) дБ. Как уже было отмечено ранее, длительность сигналов определяется не в единицах времени, а оценивается в безразмерных единицах (числом полупериодов колебаний на резонансной частоте преобразователя). Максимальная амплитуда импульса измеряется в условных единицах, пропорциональных колебательной скорости в импульсном сигнале. Это объясняется тем, что решение задачи проводится с точностью до постоянного множителя.

Из данных, представленных в таблице, можно видеть, что при малых значениях α амплитуды зондирующих импульсов значительно различаются при использовании воды и глицерина в качестве материалов внутреннего заполнения полости ПЭП. Так при $\alpha = 0,01$ разница составляет величину, превышающую 30%. Увеличение параметра α влечет за собой уменьшение этих различий. Например, при $\alpha = 0,1$ разница в амплитудах примерно составляет 5%. При $\alpha = 0,2$ она близка к 10%. Амплитуда сигнала, который излучается незаполненной сферой существенно выше, чем в случае ее заполнения рассмотренными материалами для всех значений параметра α , принятых в расчете (разница может достигать 25–50%).

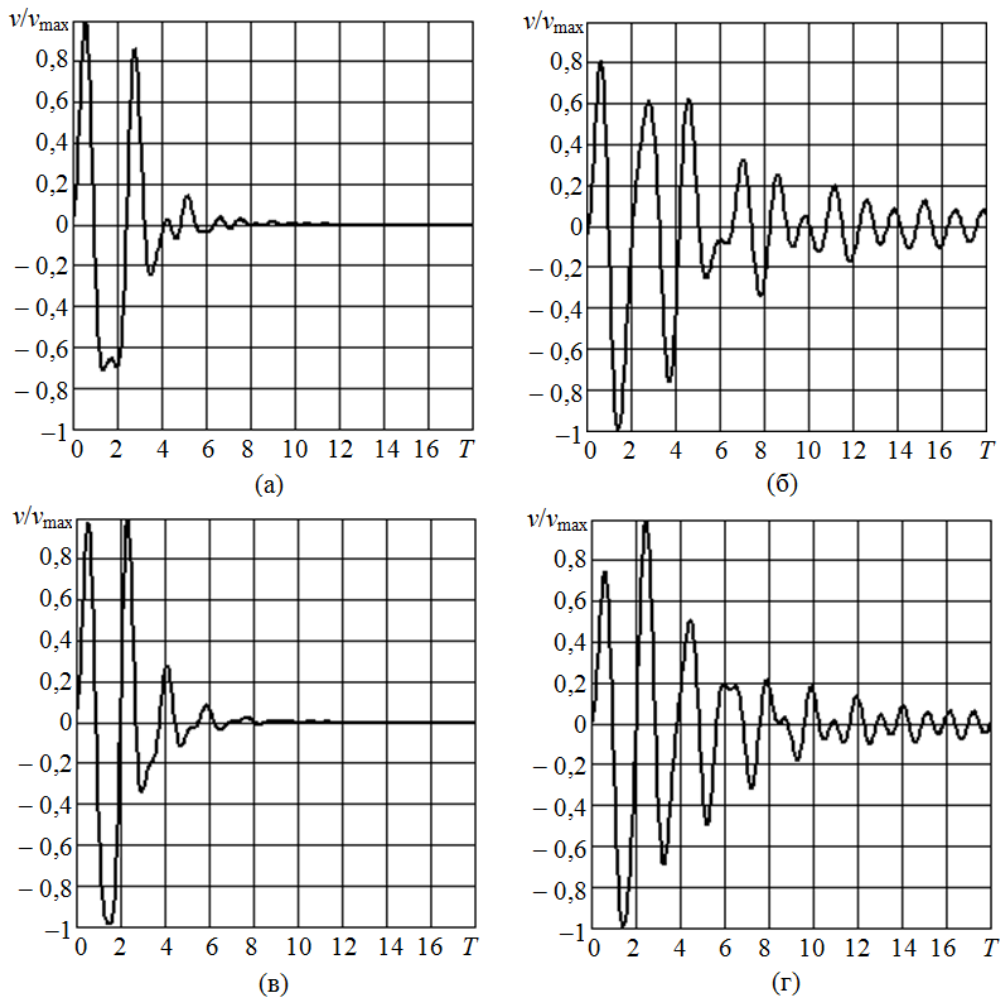


Рис. 4. Формы излучаемых акустических импульсов при наличии заполнения внутренней полости ПЭП водой (а, б) и глицерином (в, г): а) $\alpha = 0,02$; б) $\alpha = 0,15$; в) $\alpha = 0,02$; г) $\alpha = 0,15$.

Таблица. Значения длительностей и амплитуд акустических импульсов

Материал заполнения		Амплитуды и длительности излучаемых акустических импульсов					
		Значения параметра α					
		0,01	0,03	0,05	0,10	0,15	0,20
Без заполнения	Ампли- туда	0,38	0,76	0,94	1,44	1,70	1,85
	Дли- тель- ность	7	3,6	3,3	5	7	9
Вода	Ампли- туда	0,17	0,42	0,60	0,97	1,32	1,56
	Дли- тель- ность	3,5	6	9,2	11,6	16	17
Глицерин	Ампли- туда	0,12	0,34	0,53	0,92	1,14	1,40
	Дли- тель- ность	4,2	6	7	9,8	14,6	19,5

Если сравнить результаты исследований длительностей излучаемых сигналов для случаев, предполагающих отсутствие внутреннего заполнения преобразователя и его наличие, то можно утверждать следующее. При очень малых значениях параметра α пустотелый сферический ПЭП излучает сигналы, более длинные, чем в случае присутствия жидкостного заполнения. Как видно из представленных в таблице данных, при относительной толщине стенки $\alpha=0,01$ незаполненная сфера излучает сигнал длительностью 7 полупериодов, а при заполнении ее водой и глицерином длительности акустических импульсов составляют 3,5 и 4,2 полупериода, соответственно. При увеличении α ситуация изменяется – длительности зондирующих сигналов снижаются и при $\alpha=0,05$ достигается минимальная длительность (3,3 полупериода). При указанном значении параметра α сфера с заполнением излучает сигналы длительностью 9,2 полупериода (вода) и 7 полупериодов (глицерин). Дальнейшее увеличение α влечет за собой рост длительностей зондирующих импульсов для всех трех случаев, представленных в таблице.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе проведено сравнительное исследование импульсного режима работы гидроакустического сферического излучателя без заполнения внутренней полости сферы и с ее заполнением жидкими материалами (вода, глицерин) при нагрузке ПЭП на водную среду. Численно-теоретическим путем осуществлены оценки длительностей и амплитуд излучаемых зондирующих импульсов при возбуждении ПЭП электрическим сигналом в виде полупериода синусоиды на частоте радиального резонанса. Полученные результаты могут представить интерес при проектировании глубоководных гидроакустических преобразователей. Представленные оценки параметров зондирующих импульсов (в случае отсутствия внутреннего заполнения сферы) могут быть также использованы при разработке преобразователей, предназначенных для целей медико-биологической диагностики.

Литература

1. Ультразвуковые преобразователи / под ред. Е. Кикучи; пер. с англ. –М.: Мир, 1972.–424с.
2. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. –М.: Машиностроение, 1986. –280 с.
3. Пьезокерамические преобразователи: справ. / В. В. Ганопольский, Б. А. Касаткин, Ф. Ф. Легуша и др.; под ред. С. И. Пугачева. –Л.: Судостроение, 1984.–256 с.
4. Sachse Wolfgang, Hsu Nelson N..Ultrasonic Transducers for Materials Testing and Their Characterization // Physical Acoustics / Ed. by Warren P. Mason and R. N. Thurston. 1979. Vol. 14. P. 277–406.
5. Fabrication and characterization of transducers / Emmanuel P. Papadakis, Clyde G. Oakley, Alan R. Selfridge et. al.; ed. by R. N. Thurston, Allan D. Pierce and Emmanuel P. Papadakis // Physical Acoustics. 1999. Vol. 24. P. 43–134.
6. Smith Warren. Measuring the Electrical Characteristics of Piezoelectric Devices. Ultrasonic Measurement Methods / Ed. by R. N. Thurston and Allan D. Pierce // Physical Acoustics. 1990. Vol. 19. P. 267–290.
7. Sherman Charles H., Butler John L. Transducers and Arrays for Underwater Sound. Springer, 2007. –610 p.
8. Богородский В.В., Зубарев Л.А., Корепин Е.А., Якушев В.И. Подводные электроакустические преобразователи (Расчет и проектирование) / Справочник – Л.: Судостроение, 1983.–248 с.
9. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974. 256 с.

10. Гитис М. Б. Преобразователи для импульсной ультразвуковой дефектоскопии. Основные теоретические положения // Дефектоскопия. 1981, № 2, С. 65–84.
11. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей – СПб.: Политехника, 2014 – 294 с. (ISBN 978-5-7325-1045-4).
12. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Сравнение возможностей механического демпфирования преобразователей и использования согласующих слоев для получения коротких импульсов // Акуст. журнал, 1998, т.44, №1, С.119–120.
13. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Влияние демпфера на длительность акустического импульса, излучаемого многослойным преобразователем в твердую среду // Дефектоскопия, 2005, №7, с.39-45.
14. Konovalov S.I., Kuz'menko A.G. Effect of electrical circuits on duration of an acoustic pulse radiated by a piezoplate // J. Acoust. Soc. Am., 2009, Vol.125, Is.3, 1456–1460
15. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. О влиянии электрической цепи на длительность сигнала, излучаемого в воду тонкостенным пьезоцилиндрическим преобразователем с внутренним заполнением //Изв. СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2009, №6, С. 37–46.
16. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики– Л.: Судостроение, 1972, 352 с.