

Акустичні прилади та системи

УДК 534.231

DOI: [10.20535/2523-4455.2017.22.6.99700](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2017.22.6.99700)

Механические поля цилиндрического пьезокерамического излучателя силовой конструкции в присутствии акустического экрана

Старовойт Я. И., ORCID [0000-0003-0827-1633](https://orcid.org/0000-0003-0827-1633)
e-mail starovoyt.yaroslav@gmail.com

Государственное предприятие "Киевский научно-исследовательский институт гидроприборов"
Киев, Украина

Лейко А. Г., д.т.н., проф., ORCID [0000-0002-5588-6449](https://orcid.org/0000-0002-5588-6449)
e-mail og.leiko@aae.kpi.ua

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua
Киев, Украина

Реферат—В статье произведен численный анализ частотных и угловых зависимостей механических полей поверхности цилиндрического пьезокерамического излучателя с окружной поляризацией силовой конструкции в присутствии акустически мягкого цилиндрического экрана. В качестве исследуемого параметра механического поля была выбрана колебательная скорость поверхности излучателя. В результате произведенного анализа были установлены физические причины ее изменения под влиянием экрана. Также были определены закономерности поведения механических полей системы «излучатель-экран» в зависимости от частоты и размеров экрана.

Библ. 6, рис. 4

Ключевые слова — механическое поле; цилиндрический; силовая конструкция; акустически мягкий экран.

I. ВВЕДЕНИЕ

Круговые цилиндрические гидроакустические антенны нашли широкое применение при построении корабельных и авиационных гидроакустических средств обнаружения и целеуказания [1]. При этом в качестве излучателей в них зачастую используются цилиндрические пьезокерамические преобразователи силовой конструкции, располагаемые вблизи акустического экрана, размещаемого во внутренней полости антенны [2].

В то же время существующие методы расчета таких антенн [3], [4] основываются на допущении, что нормальные составляющие колебательных скоростей на поверхностях излучателей заданы. Однако, учитывая то, что излучающие антенны имеют максимальную энергетическую эффективность только при работе в области резонансных частот их преобразователей, задание значений колебательных скоростей принципиально исключает возможность учета изменений значений этих колебательных скоростей за счет реакции окружающей среды и взаимодействия преобразователей антенны по звуковому полю.

А поскольку в этих случаях собственные механические импедансы пьезокерамических преобразователей сопоставимы с их импедансами излучения, указанное выше допущение приведет к значительным расхождениям между расчетными и реальными характеристиками физических полей антенн.

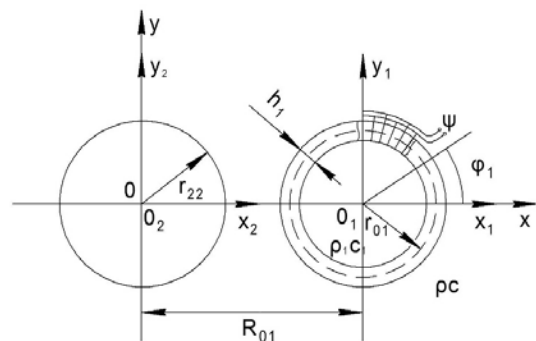


Рис. 1 Нормальное сечение системы «излучатель – экран»



Целью настоящей работы является исследование закономерностей формирования механических полей цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой конструкции, расположенных вблизи круговых цилиндрических акустически мягких экранов. Заметим, что при этом учитываются как реакция среды на возбуждение в ней звукового поля, так и взаимодействие по звуковому полю между излучателем и экраном.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучим свойства механического поля пьезокерамического цилиндрического излучателя силовой конструкции, расположенного вблизи кругового цилиндрического акустического экрана (рис. 1). Излучатель имеет окружную поляризацию, образован из N жестко склеенных призм, включенных параллельно, и возбуждается гармоническим электрическим сигналом $\psi = \psi_0 e^{-i\omega t}$, где $\omega = 2\pi f$, f - частота сигнала. Внутренняя полость излучателя вакуумирована ($\rho_1 c_1 = 0$) или заполнена воздухом при нормальном атмосферном давлении. Средний радиус пьезокерамической оболочки излучателя равен r_{01} при ее толщине h_1 . Продольная ось излучателя параллельна продольной оси экрана и расположена от нее на расстоянии R_{01} .

Акустический экран внешним радиусом r_{22} является локально реагирующим и обладает свойствами идеально податливого тела. Система «излучатель – экран» располагается в среде с волновым сопротивлением (ρc).

В качестве изучаемых характеристик механических полей примем частотные и угловые зависимости амплитуд и фаз радиальной колебательной скорости преобразователя, расположенного вблизи экрана. Расчеты численных характеристик механических полей производились с использованием аналитических соотношений, приведенных в работе [5] для тех же параметров излучателей, которые были выбраны в работе [6]. Излучатель выполнен из пьезокерамики состава ЦТБС-3 с параметрами: плотность

$$\rho_k = 7210 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad \text{пьезомодуль} \quad d_{33} = 286 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н}},$$

$$\text{модуль упругости} \quad C_{33}^E = 13,6 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}. \quad \text{Средний}$$

радиус оболочки принят равным $r_{01} = 0,068$ м при толщине стенки $h_1 = 0,008$ м и количестве призм $N = 48$. Акустический экран выполнен в виде кругового цилиндра с внешним радиусом

$$r_{22} = r_{01} + \frac{h}{2}; \quad 3 \cdot \left(r_{01} + \frac{h}{2} \right); \quad 5 \cdot \left(r_{01} + \frac{h}{2} \right).$$

Расстояние между поверхностями экрана и излучателя выбиралось равным 0,005 м. Параметры газа внутри излучателя и внешней жидкой среды принимались равными соответственно $\rho_1 = 1,27 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,

$c_1 = 330 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и $\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $c = 1500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Величина напряжения возбуждения выбрана равной $\psi_0 = 200$ В. Количество членов в разложениях полей в ряды, удерживаемых при выполнении расчетов, составляло 21. При этом несогласованность компонент поля на границах раздела областей не превышала 3%.

Проанализируем численные результаты, позволяющие установить закономерности изменения характеристик механических полей системы «излучатель – экран» в зависимости от частоты и размера акустического экрана. Анализ частотных зависимостей амплитуд и фаз радиальных колебательных скоростей вакуумированного излучателя вблизи экрана (рис. 2) показывает, что в них можно выделить три частотные области: низкочастотную ($f < 7 \cdot 10^3$ Гц), резонансную ($7 \cdot 10^3 < f \leq 12 \cdot 10^3$ Гц) и высокочастотную ($f > 12 \cdot 10^3$ Гц). Все три области характеризуются тем, что размещение излучателя вблизи акустического экрана приводит к существенному снижению амплитуд радиальных скоростей колебаний поверхности излучателя по сравнению с таковыми для одиночного излучателя при работе его вне системы. Однако при этом появляются отдельные диапазоны частот, где эта закономерность нарушается.

Низкочастотная область системы «излучатель – экран» характеризуется рядом особенностей (рис. 2). Во-первых, в этой области независимо от размера экрана колебательные скорости излучателей в системах мало отличаются между собой. Это связано с тем, что в этой области собственный механический импеданс пьезокерамического преобразователя имеет емкостной характер и в связи с этим при понижении частоты его величина быстро возрастает. В то же время сопротивление излучения преобразователя уменьшается, что обусловлено уменьшением волнового размера излучателя. Поэтому колебательные скорости излучателей определяются их собственными механическими импедансами, а влияние эффекта взаимодействия излучателя с экраном крайне незначительно. Это и подтверждается малым отличием колебательных скоростей одного и того же излучателя в системах с экранами, существенно отличающимися между собой по размерам.

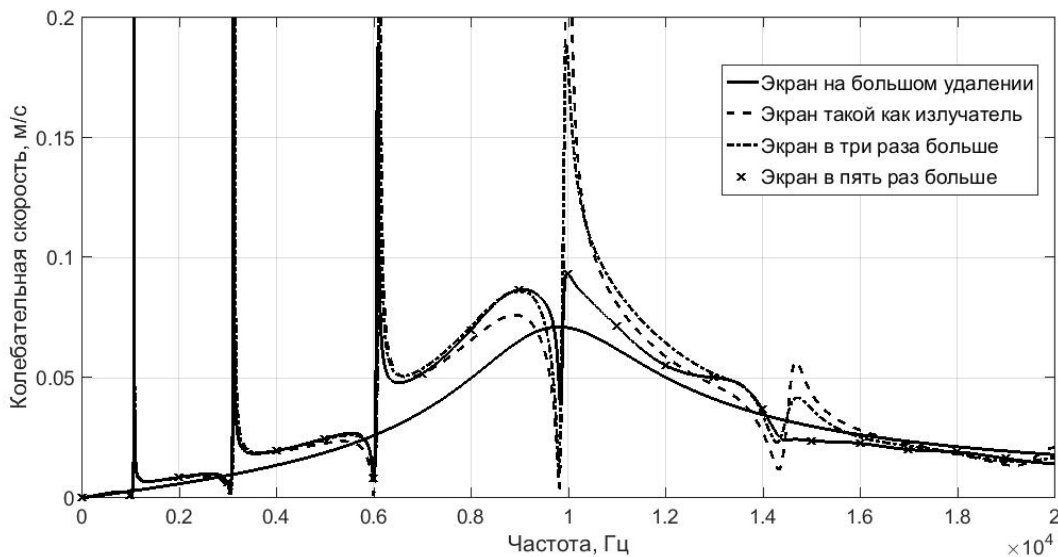
Второй особенностью рассматриваемых частотных зависимостей является появление в низкочастотной области ряда новых дополнительных резонансных областей. Их частоты резонансов мало зависят от размеров акустических экранов. Максимальные амплитуды скоростей в области этих резонансов во много раз превышают амплитуды скоростей колебаний излучателей при размещении их как в составе системы «излучатель – экран», так и вне ее. При этом увеличение размеров экранов сопровождается увеличением амплитуд колебательных скоростей на частотах более низких дополнительных резонансов. Физи-

ческие причины появления дополнительных резонансов колебательных скоростей цилиндрических излучателей в составе систем «излучатель – экран» будут установлены ниже.

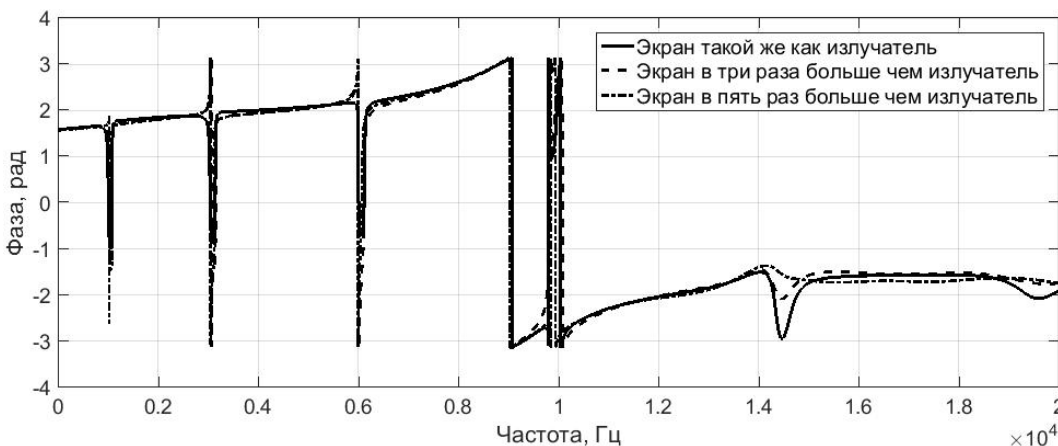
В отличие от низкочастотной области, резонансная область оболочки излучателя характеризуется тем, что ее собственные механические импедансы и импедансы излучения сопоставимы между собой. Поэтому существенное влияние приобретают реакция среды на возбуждение в ней звукового поля и обмен волнами между излучателем и экраном в рассматриваемой системе тел. Именно это и демонстрируют кривые рис. 2. При этом резонансная область разделяется на две подобласти. Частота деления незначительно зависит от размера экрана. В то же время размер экрана оказывает существенное влияние на максимальную амплитуду скорости колебаний

излучателя в резонансной области. Однако заметим при этом, что эти амплитуды оказываются меньшими (для некоторых дополнительных резонансов — в несколько раз), чем амплитуды колебательных скоростей дополнительных резонансов в низкочастотной области.

Высокочастотная область (рис. 2) характеризуется крайне слабой зависимостью колебательной скорости излучателя от размеров акустического экрана, что свидетельствует о его малом влиянии на механическое поле излучателя в системе «излучатель – экран». Это связано с увеличением собственного механического импеданса пьезокерамической оболочки излучателя, который в этой области (рис. 2б) имеет инерционный характер.

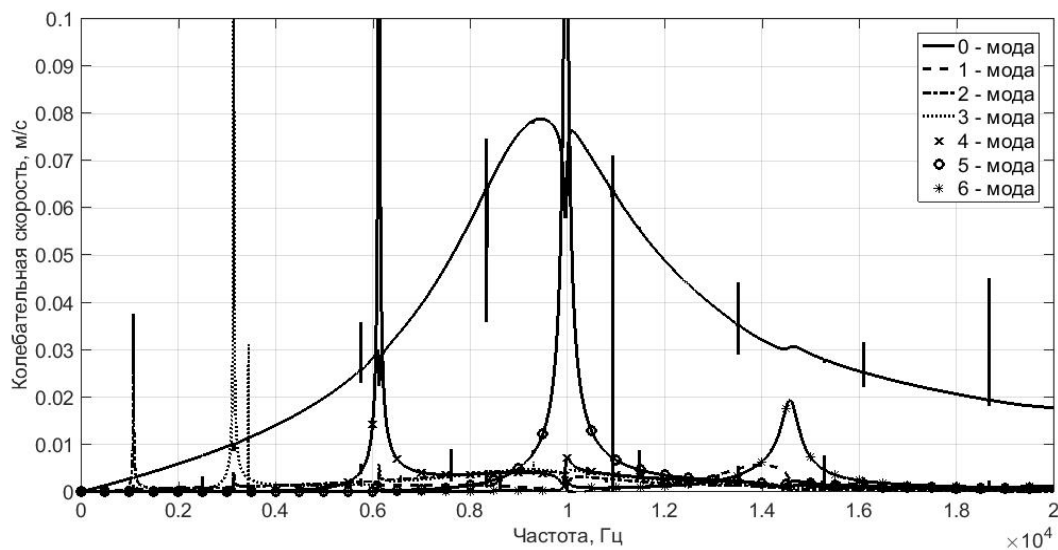


а)

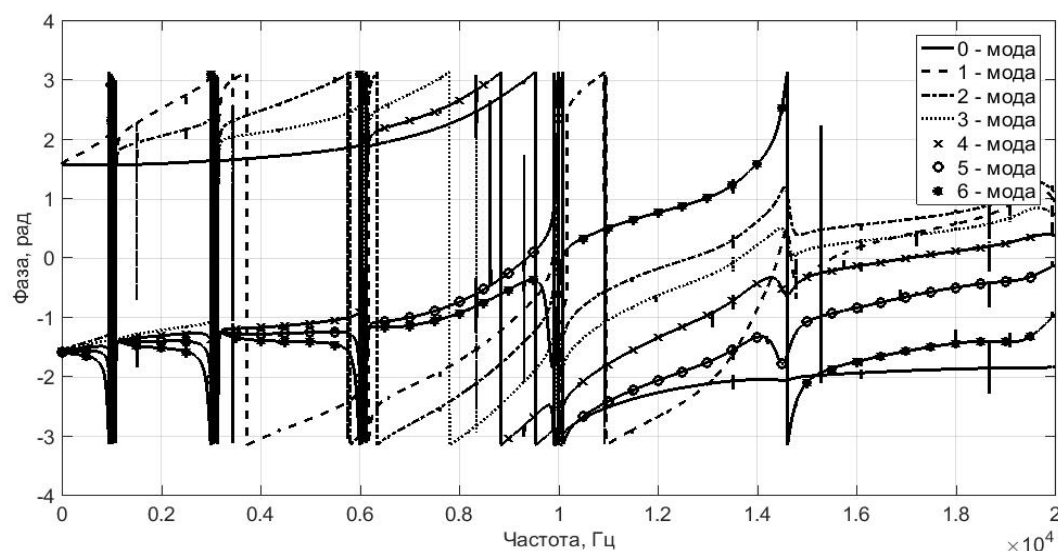


б)

Рис. 2 Частотные зависимости амплитуд (а) и фаз (б) радиальных колебательных скоростей центра противоположной экрану поверхности вакуумированного излучателя в присутствии экрана различных размеров



а)



б)

Рис. 3 Частотные зависимости амплитуд (а) и фаз (б) радиальных колебательных скоростей колебаний центра противоположной экрану поверхности заполненного воздухом излучателя в присутствии экрана с размерами $r_{22} = r_{01} + h/2$ по модам.

Заканчивая анализ приведенных на рис. 2 частотных зависимостей, можно сделать вывод, что размещение вакуумированного цилиндрического излучателя вблизи акустически мягкого экрана приводит к появлению взаимодействия между ними по звуковому полю, следствием чего является расширение и обогащение спектра собственных частот этого излучателя звука.

К силовым конструкциям излучателей относятся конструкции, внутренняя полость которых может быть либо вакуумированной, либо заполненной газом при нормальном атмосферном давлении. В последнем случае внутренняя полость цилиндрического преобразователя, которая представляет собой

замкнутый упругий объем определенных размеров, является резонирующей полостью, и ее влияние проявляется в механическом поле системы «излучатель – экран».

Анализ результатов выполненных расчетов свидетельствует о том, что заполнение газом внутренней полости излучателя еще больше расширяет и обогащает спектр собственных частот рассматриваемой системы тел. В то же время, как следует из графиков, резонансные области частот дополнительных резонансов и резонансов, связанных с внутренним объемом излучателя, существенно отличаются между собой. Это обусловлено различной реакцией внешней и внутренней сред на возбуждение в них звукового

поля, связанной с различием физических характеристик этих сред. Внешняя среда является жидкой, имеет большую плотность и скорость звука и более сильно нагружает работающий излучатель. К тому же ее нагрузка из-за наличия экрана не является радикально симметричной. Внутренняя нагрузка в 3500 раз меньше внешней и является радиально симметричной. Поэтому связанные с ней резонансы, во-первых, очень узкополосные и, во-вторых, проявляются во всех частотных областях.

Установим теперь физические причины появления выявленных выше особенностей в закономерностях формирования механических полей системы «излучатель – экран». Из физических соображений ясно, что радиационные нагрузки цилиндрического излучателя при его работе в составе системы «излучатель – экран» и вне ее существенно разнятся не только по величине, но и по угловому распределению при одном и том же характере электрического возбуждения излучателя. Одиночный цилиндрический вакуумированный излучатель при выбранном способе радиально симметричного электрического нагружения имеет радиально симметричную радиационную нагрузку. В этих условиях в нем возбуждается только одна собственная форма колебаний – нулевая мода – и существует один резонанс излучателя. В системе «излучатель – экран» радиальная симметрия излучателя нарушается из-за присутствия вблизи него акустического экрана. Естественно, что в системе с нарушенной симметрией должны появиться последующие моды колебаний. Это подтверждается графиками рис. 3. Их анализ показывает, что в рассматриваемой системе тел появляется ряд последующих мод колебаний, амплитуды скоростей которых сравнимы или превышают амплитуду скоростей нулевой моды. Поскольку в излучателе системы энергия «закачивается» только на нулевой моде, то это означает, что эта энергия эффективно перераспределяется между последующими формами колебаний оболочки излучателя.

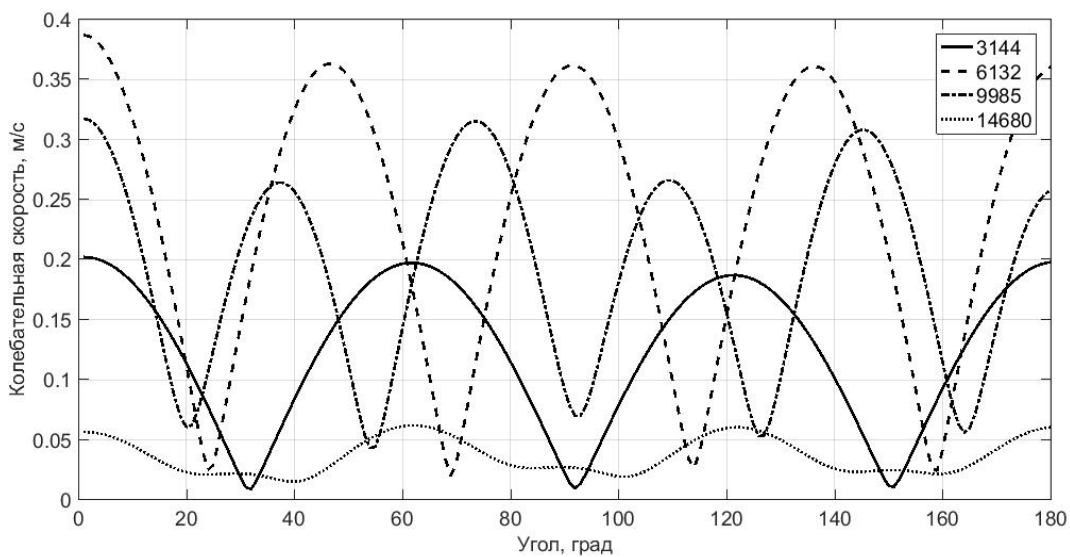
Сравнение графиков рис. 2 и рис. 3 показывает, что именно благодаря появлению этих последующих форм колебаний механическое поле рассматриваемой системы тел становится многорезонансным, а общий уровень скоростей колебаний, за исключением резонансных частот соответствующих мод колебаний, снижается. В частности, именно из-за противоположности фаз скоростей колебаний нулевой и пятой мод резонансная область одиночного излучателя разделяется на две подобласти на частоте пятой моды. Увеличение размеров экранов при сохранении неизменным расстояния между поверхностями излучателя и экрана сопровождается эффективным перераспределением энергии между модами колебаний, что отражается на величинах амплитуд колебательных скоростей мод на резонансной частоте их колебаний. При этом возрастают амплитуды скоростей самых низкочастотных резонансов колебаний, в то время как амплитуды скоростей мод колебаний в резонансной области и прилегающих к ней снизу существенно

уменьшаются. В свою очередь, это приводит к некоторому увеличению амплитуды скорости пульсирующих колебаний. Что свидетельствует о том, что увеличение размеров акустически мягкого экрана сопровождается снижением эффективности перераспределения энергии, «закачиваемой» в излучатель на нулевой моде, между последующими формами колебаний. Заметим при этом, что, поскольку уровни механических напряжений, возникающих в пьезокерамике колеблющихся оболочек, пропорциональны величинам колебательных скоростей, к тому же на низких частотах амплитуды смещений возрастают, установленные особенности в закономерностях поведения систем «излучатель – экран» могут отрицательно сказаться на механической прочности излучателей систем.

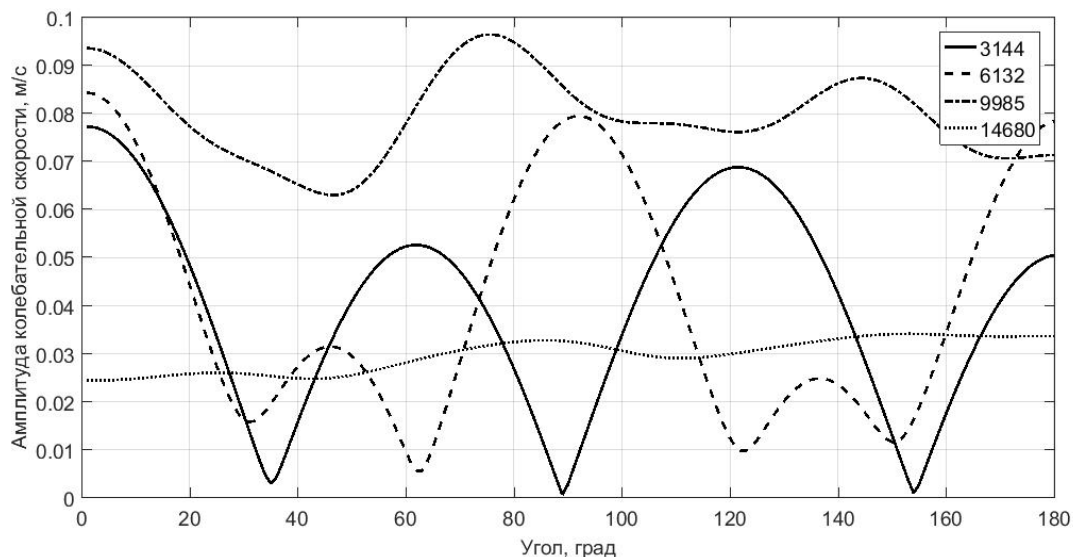
Анализ угловых распределений колебательных скоростей излучателя в системе (рис. 4) на частотах дополнительных резонансов показывает, что пульсирующие колебания излучателя при работе его вне системы преобразуются в сложные колебательные движения поверхности излучателя при размещении его вблизи акустически мягкого экрана. При этом с увеличением частоты резонансных выбросов количество циклов колебаний возрастает. Сдвиг фаз между соседними максимальными амплитудами в одном цикле зависит от частоты резонансного выброса. Увеличение размера экрана при неизменном расстоянии между поверхностями излучателя и экрана сопровождается существенными изменениями в угловых зависимостях колебательной скорости, тем большим, чем выше частота дополнительного резонансного выброса.

Выводы

В результате выполненных исследований установлен ряд новых закономерностей в формировании механических полей цилиндрическими излучателями силовой конструкции в присутствии акустически мягкого экрана. В частности, выявлены факты появления новых дополнительных резонансов и условия их возникновения. Показано, что наличие таких резонансов в системе «излучатель – экран» может приводить, во-первых, к снижению энергетической эффективности системы в области частот основного резонанса оболочки излучателя и, во-вторых, к возможности механического разрушения излучателей по той причине, что на частотах дополнительных резонансов скорости колебаний поверхности излучателя существенно (в 2 – 3 раза) превышают такие же на частоте основного резонанса оболочки излучателя и могут превысить предельно допустимую колебательную скорость, выше которой наступает механическое разрушение излучателя. Установлено, что варьирование размеров акустически мягких экранов в системах «излучатель – экран» может служить инструментом управления эффективностью электро-механического преобразования энергии.



а)



б)

Рис. 4 Угловые зависимости амплитуд радиальных колебательных скоростей излучателя вблизи экрана на частотах дополнительных резонансов при $r_{22} = r_{01} + h/2$ (а) и $r_{22} = 5 \cdot (r_{01} + h/2)$ (б).

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

- [1] A. V. Derepa, A. G. Leiko, and I. Y. Melenko, *Kompleksnaia sistema «hydroakusticheskoe vooruzhenie – nadvodnyi korabl». Problemnye aspekty sistemy «hydroakusticheskaiia stancii – nadvodnyi korabl» s antennami, razmeshhennymi v korpuse korablia [Integrated system “hydroacoustic equipment – surface ship”. The problematic aspects of the system “sonar – surface ship” with antennas placed in the ship’s hull]*, vol. 7. Kyiv, Ukraine: Izd. Dom Dmytrii Burago, 2014.
- [2] V. S. Didkovskiy, S. M. Poroshyn, O. G. Leiko, A. O. Leiko, and O. I. Drozdenko, *Konstruiuvannia elektroakustichnykh pryladiv i system dlia multymediinykh akustichnykh tekhnolohii [Construction of the electroacoustic devices and systems for multimedia speaker technology]*. Kharkiv, Ukraine: NTU “KhPI,” 2014. ISBN: 966-8861-43-4
- [3] A. G. Leiko, A. I. Nyzhnyk, and Y. I. Starovoi, “Akusticheskie svoitva tsylindricheskikh piezokeramicheskikh izluchatelei silovoi s kompensirovannoi konstruktsii s prodolnim I poperechnym piezoeffektami [Acoustic properties of cylindrical piezoceramic radiators of a power and compensated design with I,” *Electron. Commun.*, vol. 18, no. 6, pp. 62–73, 2013.
- [4] A. G. Leiko and Y. I. Starovoi, “Fizicheskie polia kruhovykh tsylindricheskikh hidroakusticheskikh antenn s ekranom I tsylindricheskimi piezokeramichnymi izluchateliami [Physical fields of circular cylindrical hydroacoustic antennas with a screen and cylindrical piezoceramic radiators],” *Electron. Commun.*,

- vol. 20, no. 3, pp. 94–100, 2015. DOI: [10.20535/2312-1807.2015.20.3.53594](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2015.20.3.53594)
- [5] A. G. Leiko, I. E. Shamarin, and V. A. Tkachenko, *Podvodnye akusticheskie anteny. Metody rascheta zvukovykh polei* [Underwater sonar arrays. Methods for calculating sound fields]. Kyiv, Ukraine: Avanpostprim, 2000. ISBN: 966-504-098-7
- [6] M. D. Smaryshev, *Napravlennost' hidroakusticheskikh antenn* [Directivity of the sonar arrays]. Leningrad, USSR: Sudostroenie, 1973.
- Надійшла до редакції 21 квітня 2017 р.

УДК 534.231

Механічні поля циліндричного п'єзокерамічного випромінювача силової конструкції в присутності акустичного екрана

Старовойт Я. І., ORCID [0000-0003-0827-1633](https://orcid.org/0000-0003-0827-1633)

e-mail starovoyt.yaroslav@gmail.com

Державне підприємство "Київський науково-дослідний інститут гідроприладів"
Київ, Україна

Лейко О. Г., д.т.н., проф., ORCID [0000-0002-5588-6449](https://orcid.org/0000-0002-5588-6449)

e-mail og.leiko@aae.kpi.ua

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua
Київ, Україна

Реферат—В статті проведений чисельний аналіз частотних та кутових залежностей механічних полів поверхні циліндричного п'єзокерамічного випромінювача з окружною поляризацією силової конструкції в присутності акустично м'якого циліндричного екрана. В якості досліджуваного параметру механічного поля була обрана коливальна швидкість поверхні випромінювача. В результаті проведеного аналізу були встановлені фізичні причини зміни її поведінки під дією акустичного екрана. Також були визначені закономірності поведінки механічних полів системи «випромінювач – екран» в залежності від частоти та розмірів екрану.

Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова — механічне поле; циліндричний; силова конструкція; акустично м'який екран.

UDC 534.231

Mechanical fields of the piezoceramic radiator of strength design situated near acoustical baffle

Ya. I. Starovoyt, ORCID [0000-0003-0827-1633](https://orcid.org/0000-0003-0827-1633)

e-mail starovoyt.yaroslav@gmail.com

State enterprise "Kyiv Research Institute Hydrodevices"
Kyiv, Ukraine



O. H. Leiko, Dr.Sc.(Eng.), Prof., ORCID [0000-0002-5588-6449](https://orcid.org/0000-0002-5588-6449)

e-mail og.leiko@aae.kpi.ua

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" kpi.ua
Kyiv, Ukraine

Abstract—Article describes the mechanical fields of the cylindrical piezoceramic transducer of the strength design, with circular polarization located near cylindrical acoustical soft baffle. As an investigated parameter of the mechanical field of transducer chosen the oscillating velocity of the surface of transducer, because, studying of this parameter has huge interest in practical applications, because on the construction stage of the creating of sonar array we have to know the maximum mechanical loads that arise in the transducer during its operation, and in the classical methods for calculating oscillating velocity of the surface of transducer is set to the constant value, so it can't identify the changes in the characteristics of the oscillating velocity on the surface of transducer, caused by the interaction between the elements of the array. Unlike the classical methods, oscillating velocity on the surface of transducer is not constant value, and numerical calculations of the physical fields provided, beginning from the electrical input of transducer. Equations, used for calculating numerical values of the oscillating velocity, obtained, using the results of solution of the "pass-through" problem of sound radiation of the cylindrical sonar array formed with cylindrical piezoceramic transducers with circular polarization and cylindrical acoustic soft baffle located in the middle of the array. This solution allows us to take into consideration interaction of the fields in the transducer itself and into array entirely. The numerical analysis of the dependencies of oscillating velocity of the surface of the transducer provided both, for frequency dependence and angle dependence. The analysis provided both, for amplitude and phase characteristics of the velocity. For the frequency dependencies we studied the oscillating velocity in the point on the surface of transducer, that lays in the opposite direction to the baffle, and for angular dependencies we chosen some interesting frequencies to provide the investigations. This frequency and angular characteristics were compared between themselves and with characteristics of transducer itself, without baffle, for situations, when we changed the distance between the transducer and the baffle and the dimensions of the baffle were constant and when we changed the dimensions of the baffle without changing the distance between baffle and the transducer. As a result of investigations we have determined physical causes of the changes in the oscillating velocity of the surface of cylindrical piezoceramic transducer as a part of the system "radiator – baffle".

Ref. 6, fig. 4.

Key words — *mechanical field; cylindrical; strength design; acoustical soft baffle.*

