

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Б. Алексеев и др.* Судовая гидроакустическая система наружной диагностики технического состояния морских магистральных трубопроводов // Научно-технический журнал «Технологии ТЭК». 2006. №5(30). С. 61-65.
2. *Столяренко Д.* Применение гидролокатора бокового обзора для прокладки и контроля положения подводного трубопровода // Научно-технический журнал «Технологии ТЭК», август 2004.
3. *Колесниченко В. В.* Обоснование технических характеристик и принципов построения гидролокационного устройства обнаружения малоразмерных целей на морском шельфе: Выпускная квалификационная работа. – РГГМУ, 2008.

**Митько Валерий Брониславович**

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

E-mail: [vmitko@yandex.ru](mailto:vmitko@yandex.ru); [vmitko@ArcticAS.ru](mailto:vmitko@ArcticAS.ru)

198188, Россия, Санкт-Петербург, ул. Васи Алексева, 30, оф. 62

Тел.: +7(812)784-7518, факс: +7(812)371-9257

**Колесниченко Вадим Владимирович,**

E-mail: [aeroklaus@mail.ru](mailto:aeroklaus@mail.ru)

**Mitko Valery Bronislavovich**

Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg

E-mail: [vmitko@yandex.ru](mailto:vmitko@yandex.ru); [vmitko@ArcticAS.ru](mailto:vmitko@ArcticAS.ru)

Of. 62, 30, Vasja Alexeev Str., Saint-Petersburg, 198188, Russia

Ph.: +7(812)784-7518, fax: +7(812)371-9257

**Kolesnichenco Vadim Vladimirovich**

E-mail: [aeroklaus@mail.ru](mailto:aeroklaus@mail.ru)

УДК 534.6

**А.М. Гаврилов, Р.О. Ситников, Г.М. Грачева**

**МНОГОЗНАЧНОСТЬ СТРУКТУРЫ ДАЛЬНЕГО ПОЛЯ СФЕРИЧЕСКИ  
СХОДЯЩЕГОСЯ ВОЛНОВОГО ПУЧКА**

*В работе теоретически и экспериментально впервые показано, что структура поля в дальней зоне фокусирующего излучателя качественно изменяется в зависимости от значения кривизны фазового фронта  $\delta_0$ . Установлены условия, при которых для рассматриваемого излучателя на акустической оси в дальней области поля формируется максимум или минимум амплитуды. Получено качественное согласие теоретических и экспериментальных результатов. Предложен новый метод диагностики неоднородностей среды.*

*Фокусирующий излучатель; параболическое уравнение; кривизна фазового фронта; экспериментальные исследования; диагностика неоднородностей.*

**A.M. Gavrilov, R.O. Sitnikov, G.M. Gracheva**

**MULTIFORMITY OF A FAR FIELD STRUCTURE OF SPHERICALLY  
CONVERGENT WAVE BEAM**

*In this article theoretically and experimentally for the first time are shown, that field structure of focusing radiator at far field variates in workmanlike manner according to value of phase front curvature  $\delta_0$ . The conditions are determined, at which maximum or minimum of amplitude on axis at far field radiator are formed. The calculations are in agreement with experimental results. The method of diagnostics of medium heterogeneity is developed.*

*Focusing radiator; parabolic equation; phase front curvature; experimental investigations; diagnostics of heterogeneity.*

В работе [1] было показано, что структура поля сферически расходящегося звукового пучка на оси в дальней зоне качественно изменяется в зависимости от значения безразмерной кривизны волнового фронта  $\delta_0$ . Это обусловлено интерференцией вкладов фазовых зон Френеля, размещающихся на поверхности излучателя, количество которых связано с параметром  $\delta_0$  соотношением  $N = \delta_0/\pi$ . В случае четного числа зон Френеля амплитуда волны в приосевой области пучка практически равна нулю, при нечетном их числе амплитуда максимальна. В данной работе установлено, что такая особенность присуща и полю фокусирующего излучателя. Значения  $\delta_0$ , при которых в дальней области поля на оси фокусирующего излучателя с равномерным поперечным распределением амплитуды формируется минимум или максимум амплитуды, совпадают со случаем сферически расходящегося пучка и равны соответственно  $\delta_0 = (2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots)$  и  $\delta_0 = (0, 3\pi, 5\pi, \dots)$  [1]. Несмотря на большое количество работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных исследованию поля сферически вогнутого излучателя (см., например, [2 – 4] и др.), данная особенность поля рассматривается впервые в настоящей работе.

Для рассмотрения поля сферически сходящегося монохроматического пучка с узким угловым спектром в однородной среде воспользуемся параболическим уравнением дифракции [5]. С целью упрощения численного анализа решение уравнения для комплексной амплитуды волны  $P_n(r_n, z_n)$  удобно записать в безразмерном виде [1]

$$P_n(r_n, z_n, \delta_0) = \frac{2i}{z_n} \exp\left(-\frac{ir_n^2}{z_n}\right) \int_0^1 f(r_{n0}) \exp\left[-\frac{ir_{n0}^2(1 + \delta_0 z_n)}{z_n}\right] J_0\left(\frac{2r_{n0}r_n}{z_n}\right) r_{n0} dr_{n0}. \quad (1)$$

Здесь  $r_n = r/a$  – поперечная координата, нормированная на радиус излучателя;  $z_n = z/l_\delta = 2z/ka^2$  – осевая координата, нормированная на длину области дифракции Френеля пучка  $l_\delta = ka^2/2$ ;  $k = \omega/c_0$  – волновое число;  $f(r_{n0})$  – функция, описывающая поперечное распределение амплитуды на поверхности излучателя на входе среды ( $z_n = 0$ );  $\delta_0 = l_\delta/R_0 = ka^2/2R_0$  – безразмерная кривизна излучателя, равная отношению  $l_\delta$  к его радиусу кривизны  $R_0$ ;  $J_0$  – функция Бесселя нулевого порядка. Полученное решение (1) является точным, справедливо в произвольной точке поля и для разных амплитудных распределений  $f(r_{n0})$ . Геометрия фокусирующего излучателя представлена на рис. 1.

Для сравнения полученной модели (1) был проведен расчет акустического поля фокусирующего излучателя методом интеграла Рэлея. Выражение для ампли-

туды давления  $P(z)$  на оси излучателя при равномерном возбуждении имеет вид [4]:

$$P(z) = \rho_0 c_0 v_0 \left[ \exp(ikz) - \exp \left( ik \sqrt{ \left[ z - R_0 (1 - \sqrt{1 - (a/R_0)^2}) \right]^2 + a^2 } \right) \right] / (1 - z/R_0), \quad (2)$$

где  $\rho_0$  и  $c_0$  – плотность и скорость звука среды;  $v_0$  – скорость на поверхности излучателя;  $z$  – осевая координата. Используя безразмерные параметры  $P_n$ ,  $z_n$ ,  $\delta_0$  и  $A = ka/2$ , запишем выражение (2) в виде

$$P_n(z_n) = \exp(2A^2 iz_n) - \exp \left[ 2Ai \sqrt{ A^2 \left[ z_n - \left( 1 - \sqrt{1 - (\delta_0/A)^2} \right) / \delta_0 \right]^2 + 1 } \right] / (1 - \delta_0 z_n). \quad (3)$$

С целью проведения эксперимента авторами был изготовлен фокусирующий преобразователь с радиусом кривизны сферически вогнутой пьезокерамической пластины  $R_0 = 7,4$  см, радиусом апертуры излучающей поверхности  $a = 22$  мм и резонансной частотой  $\omega/2\pi \approx 842$  кГц. Пьезопластина имеет по краю конструктивный элемент в форме фланца, рис. 1. Для устранения нежелательного излучения со стороны фланца его покрывали звукопоглощающим материалом достаточно большой толщины. Для подавления изгибных волн, неизбежно возникающих в пьезопластине при работе излучателя на толщинной моде колебаний, пьезоэлемент клеивался по контуру в эбонитовый вкладыш.

Измерения проводились в импульсном режиме излучения. Напряжение сигнала на излучателе соответствовало режиму малой амплитуды, когда нелинейные процессы для волны в среде еще не проявляются. Регистрация принятых сигналов осуществлялась цилиндрическим звукоприемником с размерами  $3 \times 3$  мм. В качестве рабочей среды использовалась пресная вода. Экспериментальная частотная зависимость активной составляющей полной электрической проводимости  $\text{Re}(Y)$  фокусирующего излучателя приведена на рис. 2.

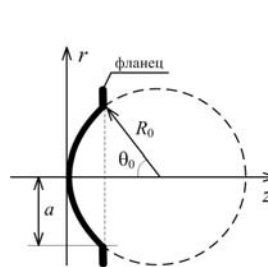


Рис. 1. Геометрия излучателя

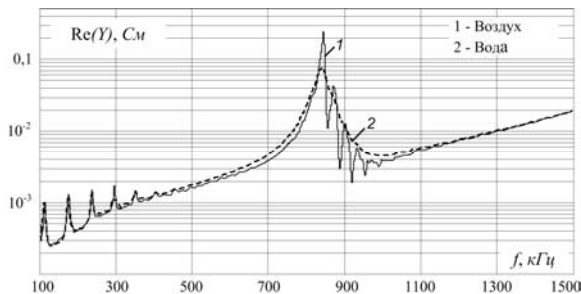


Рис. 2. Частотная характеристика активной составляющей полной электрической проводимости фокусирующего преобразователя

В проводившемся эксперименте условия минимума и максимума амплитуды на оси фокусирующего излучателя в дальней зоне находились подбором частоты излучаемого монохроматического сигнала. Для используемого излучателя соот-

ветствующие значения частот оказались равными (422 кГц для  $\delta_0 = 2\pi$ , 886 кГц для  $\delta_0 = 4\pi$ ) и (653 кГц для  $\delta_0 = 3\pi$ , 1052 кГц для  $\delta_0 = 5\pi$ ).

На рис. 3 приведены экспериментальные осевые распределения амплитуды волны фокусирующего излучателя в логарифмическом масштабе по оси абсцисс (а) и в децибелах (б), нормированные на максимальное значение. Повышение частоты излучаемого сигнала приводит, как видно из рис. 3,а, к увеличению дифракционной длины пучка  $l_D$ , в результате чего пучок на частоте 422 кГц (кривая 1) становится расходящимся быстрее, чем в других случаях. С повышением частоты излучаемого сигнала увеличивается количество зон Френеля, участвующих в формировании поля, что увеличивает количество осцилляций до и после фокуса, а также это приводит к уменьшению фокального пятна и к его смещению от излучателя. В дальней зоне излучателя ( $x > l_D$ ) условие минимума амплитуды волны на оси имеет место на частотах 422 и 886 кГц, а максимума при 653 и 1052 кГц, что наглядно видно из рис. 3,б. Так, кривые 2 и 4 имеют закон спада амплитуды, равный минус 20 дБ/дек (что соответствует закону спада сферической волны), в то время как это значение равно минус 40 дБ/дек для кривых 1 и 3.

Отличительной особенностью поля фокусирующего излучателя является наличие фокальной области при любых значениях параметра  $\delta_0$ .

В работе был проведен теоретический анализ влияния амплитудного распределения на поверхности излучателя  $f(r_{n0})$  на структуру поля. На рис. 4 представлены результаты расчета амплитуды волны с использованием выражений (1), (3) и экспериментальные зависимости, полученные для значений  $\delta_0 = 2\pi$  (а),  $\delta_0 = 3\pi$  (б),  $\delta_0 = 4\pi$  (в),  $\delta_0 = 5\pi$  (г). Видно, что наиболее лучшие результаты дает равномерное амплитудное распределение  $f(r_{n0}) = 1$ . При неравномерном амплитудном распределении условия минимума и максимума амплитуды волны на оси излучателя нарушаются. Отметим хорошее согласие двух моделей расчета, а также качественное согласие теории и эксперимента.

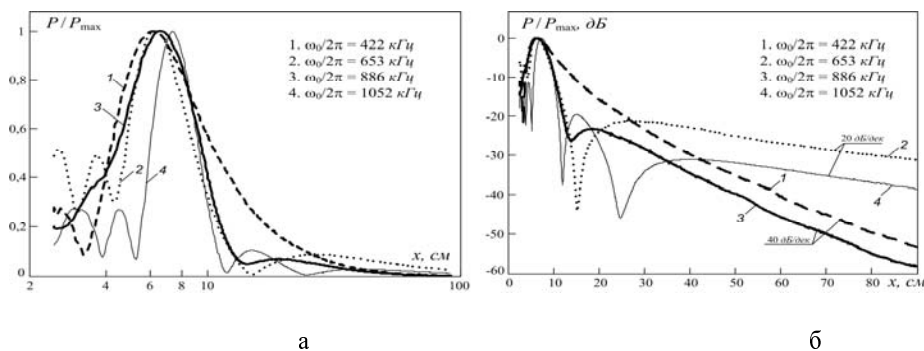


Рис. 3. Экспериментальные осевые распределения амплитуды волны при разных значениях частоты излучаемого сигнала

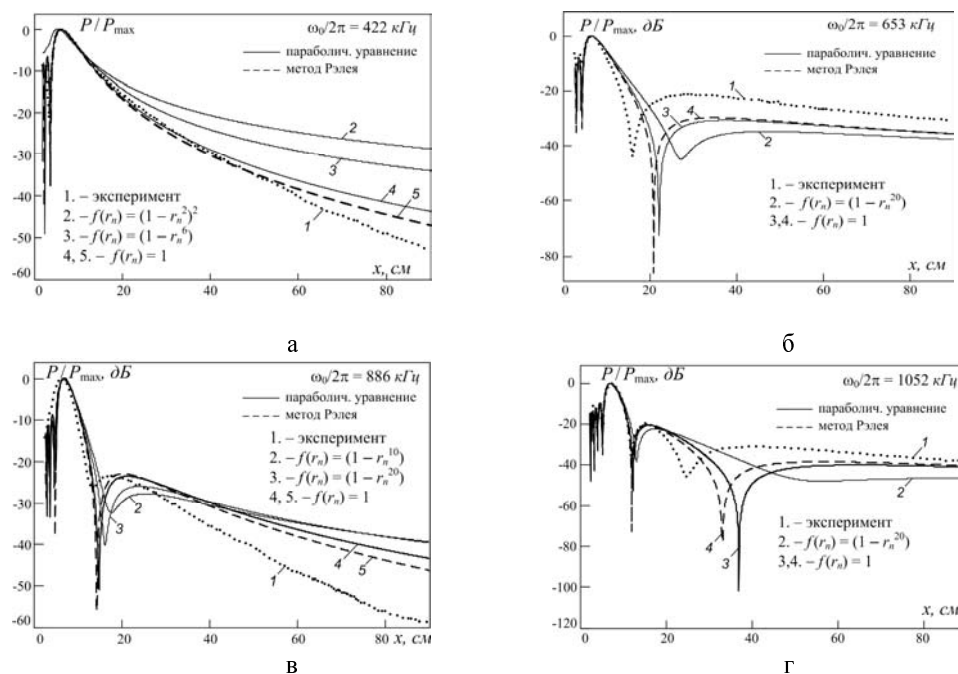
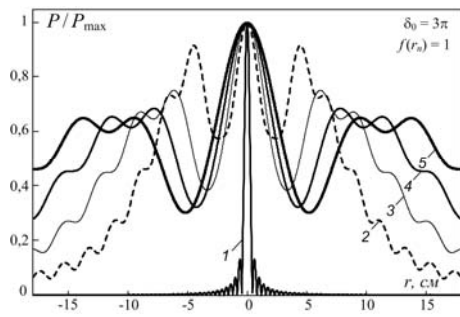


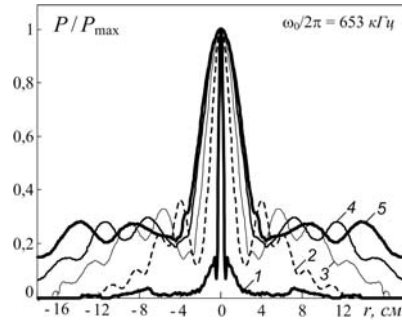
Рис. 4. Продольные распределения амплитуды волны при разных значениях частоты сигнала и амплитудном распределении

Теоретические и экспериментальные поперечные распределения амплитуды на разных расстояниях от излучателя при  $\delta_0 = 3\pi$  и  $\delta_0 = 4\pi$  приведены на рис. 5,а,б и рис. 5,в,г соответственно. Видно, что в дальней зоне при  $\delta_0 = 3\pi$  формируется максимум амплитуды, а при  $\delta_0 = 4\pi$  минимум. Основные проявления структуры поля фокусирующего излучателя уже сформировались, сохраняя с ростом расстояния свойственные ей признаки в форме минимумов и максимумов, количества боковых лепестков.

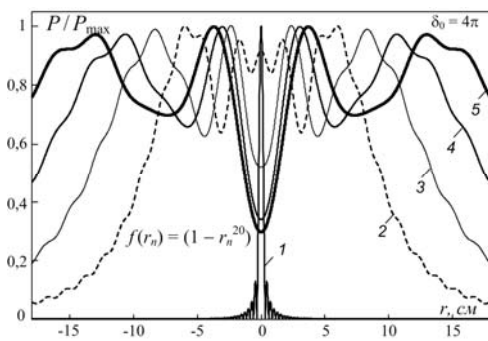
В задачах экологического мониторинга для обнаружения неоднородностей в водных районах представляет интерес разработка новых методов диагностики среды. Особенности структуры поля фокусирующего излучателя при значениях безразмерной кривизны  $\delta_0 = (2\pi, 4\pi, \dots)$  позволяют создать новый перспективный метод экологического мониторинга. На рис. 6 представлены экспериментальные осевые распределения амплитуды волны фокусирующего излучателя при наличии (кривые 2) и отсутствии (кривые 1) неоднородностей в среде, в качестве которых использовалась пелена пузырей, для значений кривизны  $\delta_0 = 2\pi$  и  $\delta_0 = 4\pi$ . Для генерации пузырей использовался каталитический способ. Диаметр пузырька составлял  $1 \div 5$  мкм. Кривые 2 наглядно иллюстрируют нарушение условия минимума амплитуды волны на оси пучка при наличии в среде неоднородностей, что обусловлено нарушением пространственного (фазового) синхронизма волны.



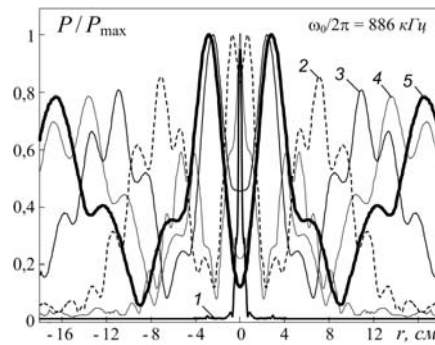
а – расчет



б – эксперимент

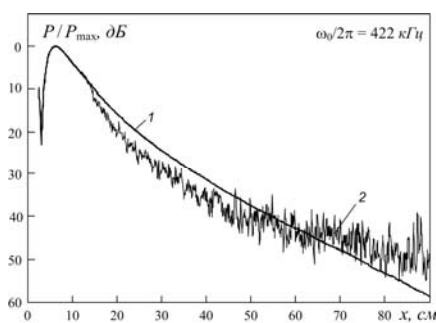


в – расчет

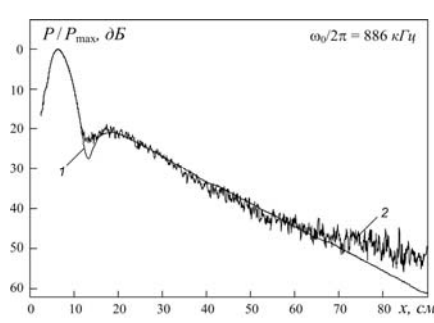


г – эксперимент

Рис. 5. Поперечные распределения амплитуды волны при разных значениях частоты сигнала и для разных расстояний  $x$  от излучателя (1 – фокусное расстояние, 2 – 40 см, 3 – 55 см, 4 – 70 см, 5 – 85 см)



а



б

Рис. 6. Осевые распределения амплитуды волны при отсутствии (кривая 1) и наличии (кривая 2) на расстоянии  $x=15$  см от излучателя пелены пузырей

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаврилов А.М., Грачева Г.М., Ситников Р.О. Экспериментальное исследование акустического поля сферически выпуклого излучателя // Сборник трудов XX сессии Российского акустического общества. Т. 1. – М.: ГЕОС. 2008. С. 182 – 185.
2. Источники мощного ультразвука / Под ред. Л.Д. Розенберга – М.: Наука, 1967.
3. Каневский И.Н. Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн. – М.: Наука, 1977. – 336 с.
4. Катиньоль Д., Сапожников О.А. О применимости интеграла Рэлея к расчету поля вогнутого фокусирующего излучателя // Акуст. журн., 1999. Т. 45, № 6. С. 816 – 824.
5. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. – М.: Наука, 1990. – 432 с.

**Гаврилов Александр Максимович**

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге

E-mail: [gavr\\_am@mail.ru](mailto:gavr_am@mail.ru)

347928, Россия, Ростовская обл., г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44

Тел.: 8(8634)37-17-95

**Ситников Роман Олегович**

E-mail: [roman\\_sitnikov@mail.ru](mailto:roman_sitnikov@mail.ru)

**Грачева Галина Михайловна**

E-mail: [roman\\_sitnikov@mail.ru](mailto:roman_sitnikov@mail.ru)

**Gavrilov Alexander Maksimovich**

Taganrog Institute of Technology - Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"

E-mail: [gavr\\_am@mail.ru](mailto:gavr_am@mail.ru)

44, Nekrasovskiy, Taganrog, Rostov areas, 347928, Russia, Ph.: +7(8634)37-17-95

**Sitnikov Roman Olegovich**

E-mail: [roman\\_sitnikov@mail.ru](mailto:roman_sitnikov@mail.ru)

**Gracheva Galina Michailovna**

E-mail: [roman\\_sitnikov@mail.ru](mailto:roman_sitnikov@mail.ru)

УДК 551.463 + 551.464

**Я.А. Экба, Р.С. Дбар**

**ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ БЕРЕГОВЫХ НАНОСОВ  
ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ АБХАЗИИ**

*Берега Абхазии, протянувшиеся на 240 км в восточной части Чёрного моря, характеризуются слабым расчленением и весьма приглубыми берегами, что способствует образованию сильного волнения, по типу океанического. Сильные штормы, наблюдающиеся с октября по март, приводят к усилению абразионных процессов, размыву пляжей. В результате естественных процессов в сочетании с неоправданной хозяйственной деятельностью человека береговая зона испытыва-*