

УДК 534.222; 534(204.1)

Ю.В. Душенин, В.В. Гурский

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ В ДОННЫХ ОСАДКАХ
ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ПАДЕНИИ ПУЧКА НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА**

Рассмотрены вопросы нелинейного взаимодействия в узких пучках при вертикальном падении на границу раздела «вода – донные осадки (ДО)». Проиллюстрировано поле параметрической антенны (ПА) при вертикальном зондировании дна. Представлено решение, описывающее поле ПА в многофазной среде «вода – ДО». Рассчитаны и экспериментально получены результаты, описывающие поведение основных характеристик поля, создаваемого ПА в воде и в ДО. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований установлен факт эффективного возбуждения, генерации и распространения продольных ВРЧ в глине и песке при вертикальном зондировании дна.

Параметрическая антенна; нелинейное взаимодействие; донные осадки; продольная волна.

Yu.V. Duchenin, V.V. Goorskey

**ANALYSIS OF THE PARAMETRIC ARRAY FIELD BASIC PERFORMANCES
IN BOTTOM SEDIMENTS AT VERTICAL INCIDENCE ON INTERFACE**

Problems of nonlinear interaction in narrow beams at vertical incidence on «water – bottom sediments (BS)» interface are considered. The field of the parametric array (PA) at vertical sounding of the bottom is illustrated. The decision, which describes the field of the PA in multiphase medium «water – BS» is presented. The basic performances of the field behavior created by the PA in water and in BS are computed and experimentally confirmed. On the basis of theoretical and experimental researches the fact of effective feed, shaping and propagation of the longitudinal intercarrier frequency waves in clay and sand at vertical sounding of the bottom was established.

Parametric array; nonlinear interaction; bottom sediments; longitudinal wave.

В целях экологического мониторинга дна Мирового океана в последнее время получили широкое применение параметрические профилографы, принцип работы которых основан на нелинейном взаимодействии акустических сигналов при вертикальном зондировании дна. Большая эффективность применения таких устройств для задач стратификации приповерхностных осадочных слоев и обнаружения заиленных объектов обусловлена их способностью формировать высоконаправленное излучение на низких частотах при малых габаритах исходной излучающей антенны накачки в водной среде [1, 2] с последующим его проникновением через границу раздела в донные осадки (ДО) [3].

Для параметрической антенны (ПА) профилографа сама физическая среда обнаружения «вода – ДО» является «активным элементом» и правомерно предположить зависимость ее характеристик от структуры ДО.

В предлагаемой работе представлены результаты экспериментальных исследований основных характеристик поля, создаваемого ПА в ДО при нормальном падении на границу раздела. Под основными характеристиками подразумеваются: осевое распределение амплитуды звукового давления волн разностной частоты (ВРЧ), поперечное распределение ВРЧ, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ВРЧ для случаев, когда исходный излучатель накачки расположен в воде на расстояниях от границы раздела сопоставимых с длиной зоны дифракции l_d . Кроме того, приведено сравнение экспериментальных результатов с расчетами, выполненными на основании теоретически разработанной ранее модели [3, 4], полученной из решения уравнения Хохлова–Заболотской–Кузнецова (ХЗК).

В качестве физических моделей ДО использовались глина и песок, основные акустические характеристики которых взяты из [6] и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип ДО	ρ_l , кг/м ³	c_l , м/с	ε_l	W_{np}	β_{l0} , дБ/м	β_l , дБ/м	Δf , кГц
Песок	2010	1830	10	0,60	60	2-10	10-50
Глина	1440	1540	8	0,80	40	0,7-4	10-50

В таблице использованы следующие обозначения: ρ_l – плотность ДО; c_l – скорость распространения продольных волн в ДО; ε_l – параметр нелинейности для ДО; W_{np} – коэффициент прохождения через границу раздела; β_{l0} – коэффициент затухания продольных волн накачки в ДО; β_l – коэффициент затухания продольных ВРЧ в ДО; Δf – диапазон частот для β_l .

На рис. 1 показана схема работы ПА при вертикальном зондировании для случаев, когда граница раздела «вода – ДО» находится в области нелинейного взаимодействия исходных волн накачки.

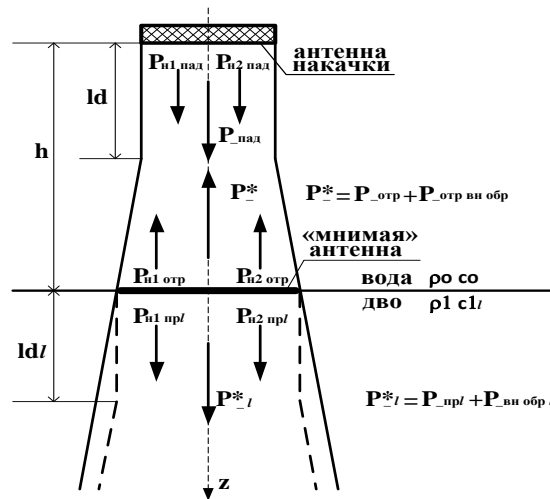


Рис. 1. Поле ПА при вертикальном зондировании границы раздела

В работах [3, 4, 6] было показано, что ДО по своей структуре близки к жидким нелинейным средам распространения, таким как вода. Поэтому для описания процессов взаимодействия и генерации в этих средах использовалась теоретическая модель на основе решения уравнения ХЗК, традиционно применяемой в нелинейной гидроакустике [1].

Полученное решение для расчета характеристик ПА в многофазной среде «вода – ДО» для продольных волн представлено в виде суммы трех интегралов [3, 4]:

$$P_l(r, h, z) = \frac{iQ_0}{L_{D0}} \int_0^h \Phi_0(r, h) dh + \frac{iQ_{l1} W}{L_{Dl}} \int_0^h \Phi_{l1}(r, z) dz + \frac{iQ_{l2} W^2}{L_{Dl}} \int_0^z \Phi_{l2}(r, z) dz, \quad (1)$$

где Q_0, Q_1, Q_2 – константы, включающие параметры сред взаимодействия и преобразователя накачки; $\Phi_0(r, h), \Phi_1(r, z), \Phi_2(r, h)$ – передаточные функции ПА для соответствующей среды распространения [1, 3–5]; h – расстояние до границы раздела; z – расстояние до точки наблюдения в ДО.

Первый интеграл в уравнении (1) описывает процесс взаимодействия исходных волн в воде, второй интеграл – процесс прохождения из воды продольной ВРЧ в ДО, третий – генерацию продольных ВРЧ за счет взаимодействия волн накачки непосредственно в ДО.

На основании уравнения (1) были произведены расчеты основных характеристик поля ПА в воде и в ДО, которые будут приведены на графиках ниже, совместно с экспериментальными результатами.

Предварительно, до проведения экспериментальных исследований, был выбран лабораторный бассейн с размерами 2,0x1,2x2,0 м, разделенный на две секции, в которые по отдельности помещались глина и песок, слоями глубиной 0,7 м, заливались водой и отстаивались в течение 1,5 лет для дегазации. В ДО на глубинах от 0,05 до 0,5 м размещались измерительные сферические гидрофоны с шагом 0,05 м. Излучатель накачки с центральной частотой $f_0 = 250$ кГц и геометрическими размерами $a = 0,08$ м; $b = 0,08$ м размещался на координатном устройстве в воде над дном на расстоянии $h = 1$ м и был ориентирован своей рабочей поверхностью параллельно к границе раздела. Все экспериментальные исследования проводились в диапазоне частот ВРЧ от 10 до 50 кГц.

На первом этапе была произведена оценка давлений падающего, отраженного сигналов. Согласно закону сохранения энергии, для данного случая, равенство для коэффициентов отражения V и прохождения W , согласно [6], запишется в виде

$$V + W = 1. \quad (2)$$

Для падающего и отраженного сигналов были сняты АЧХ для частот накачки и ВРЧ, представленные на рисунке 2.

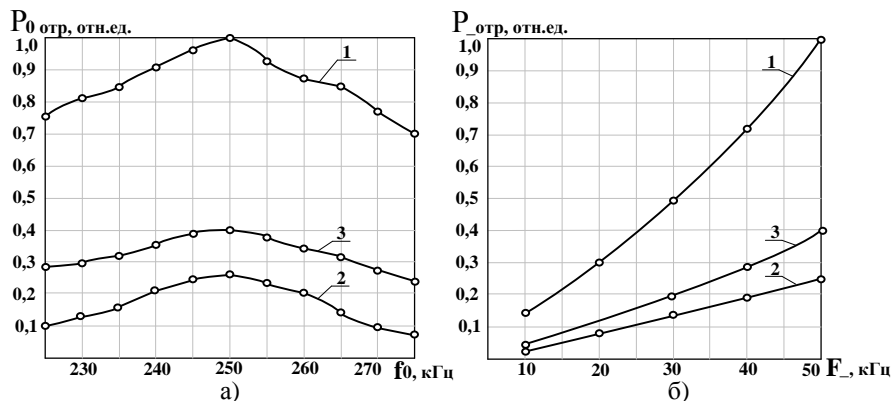


Рис. 2. АЧХ-частот накачки: а – АЧХ ВРЧ; б – (1 – прямой сигнал, 2 – отраженный от границы раздела «вода – глина», 3 – «вода – песок»)

Из данных зависимостей видно, что от границы раздела «вода – глина» отражается порядка 25 %, а от границы раздела «вода – песок» порядка 40 % от падающего излучаемого сигнала, оставшаяся часть энергии проходит непосредственно в ДО.

Распределения амплитуд звуковых давлений сигналов первичных и вторичных полей на оси до границы раздела и после нее следует отнести к наиболее информативным характеристикам процесса нелинейного взаимодействия, позволяющим составить наиболее полную физическую картину особенностей формирования ВРЧ. Так, на втором этапе по формуле (1) были вначале рассчитаны, а затем экспериментально получены осевые распределения амплитуды звукового давления ВРЧ до границы раздела и после, приведенные на рис. 3.

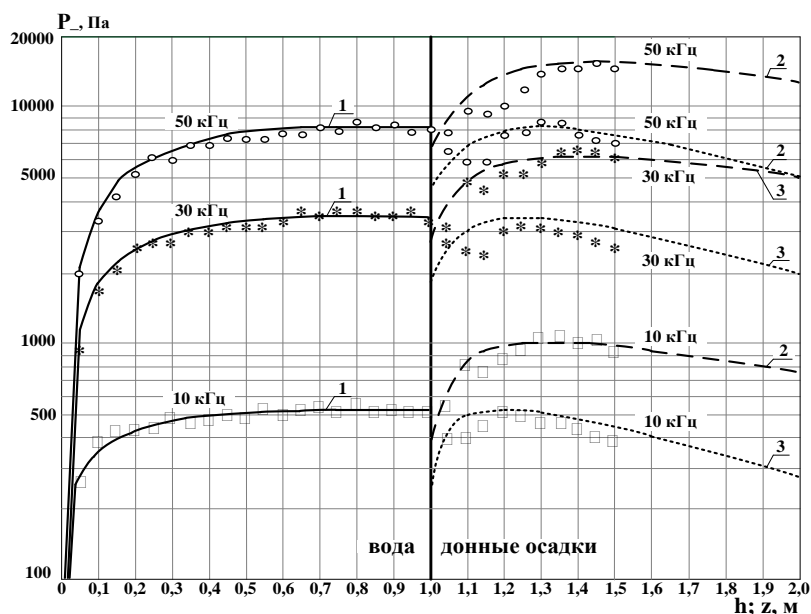


Рис. 3. Осевые распределения амплитуды звукового давления ВРЧ в воде и в ДО (1 – вода, 2 – глина, 3 – песок)

Кривыми показаны расчетные результаты, значками – экспериментальные. Исследования проводились для частот $F = 10; 30; 50$ кГц. Из рис. 3 видно, что в ДО в зоне дифракции (до l_d) происходит генерация сигнала с последующим его убыванием. Следует обратить внимание на то, что наблюдается эффект дополнительной «подкачки» амплитуды ВРЧ, обусловленный, по нашему мнению, существенно большим параметром нелинейности в ДО.

Амплитудно-частотные зависимости позволяют увидеть эффективность процессов нелинейного взаимодействия в средах. На рис. 4 представлены АЧХ ВРЧ в воде и ДО, которые были получены экспериментально на фиксированных расстояниях, для воды $h = 1$ м, для глины и песка $z = 0,5$ м. Измерения проведены в диапазоне ВРЧ от 10 до 50 кГц с шагом через 10 кГц.

Полученные расчетные и экспериментальные зависимости АЧХ в ДО достаточно хорошо совпадают. Они демонстрируют приближенные квадратичные зависимости изменения уровней амплитуд давлений разностных сигналов от их частоты. Эффективность процессов взаимодействия в ДО возрастает с увеличением разностной частоты, как это характерно и для воды.

Основным достоинством устройств и систем, работающих на принципах нелинейной гидроакустики, является возможность формирования высоконаправленного излучения звуковых пучков при малых габаритах исходного излучателя накачки [5]. Поэтому наиболее важной характеристикой процесса нелинейного взаимодействия акустических волн в ДО, как и в воде, является поперечное распределение.

На рис. 5 показаны поперечные распределения ВРЧ в воде и в ДО, полученные расчетным путем (сплошные кривые) и экспериментально (отмечены маркерами). Эксперименты проводились на фиксированных расстояниях, для воды $h = 1$ м, для глины и песка $z = 0,5$ м, для ВРЧ $F = 10; 30; 50$ кГц.

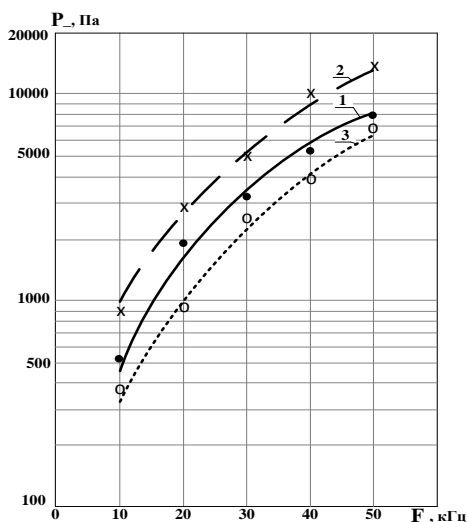


Рис. 4. АЧХ звукового давления ВРЧ в воде и в ДО (1 – вода, 2 – глина, 3 – песок)

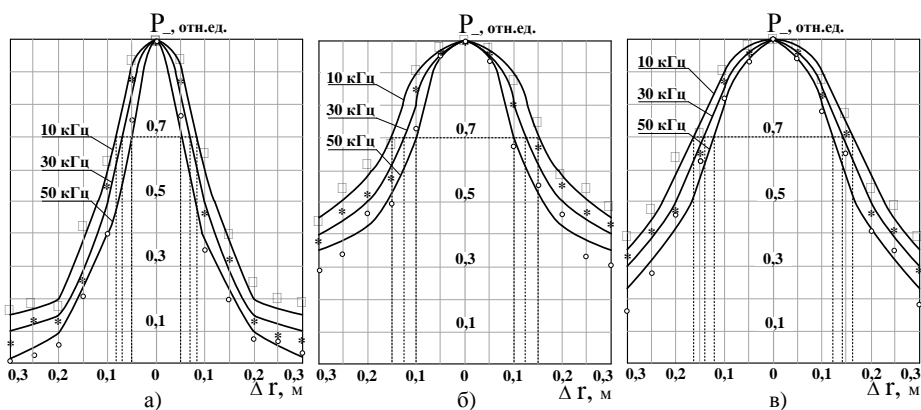


Рис. 5. Поперечное распределение звукового давления ВРЧ в воде и в ДО: а – вода, б – глина; в – песок

Из рис. 5 видно, что традиционно для ПА при работе в нелинейных средах практически отсутствует боковое поле. Кроме того, с увеличением значений разностной частоты ширина поперечного распределения обужается.

Таким образом, представленные теоретические и экспериментальные результаты основных характеристик ПА в ДО при нормальном падении пучка на границу раздела дают достаточно хорошее совпадение, что подтверждает факт правильности выбора физической модели эффективного возбуждения, генерации и распространения продольных ВРЧ для случая вертикального прохождения акустических сигналов в ДО, а также показывает, что использование режима частичной генерации ВРЧ в ДО достаточно эффективно и может использоваться для обнаружения заиленных малоразмерных целей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1981.– 264 с.

2. *Мюрр Т. Дж.* Нелинейная акустика и ее роль в геофизике морских осадков. – В кн. Акустика морских осадков / Под ред. Л. Хэмптона. – М.: Мир, 1977. – С. 227-273.
3. *Душенин Ю.В.* Исследование нелинейного взаимодействия акустических волн для оценки экологического состояния донных водонасыщенных осадочных сред. // Тезисы докладов XXI молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». – М.: МГАТУ, 1995. – № 5. – С. 31.
4. *Душенин Ю.В., Рыбачек М.С.* Возбуждение акустических волн параметрической излучающей антенной в неконсолидированных средах // Известия ТРТУ. – 1997. – № 1 (4). – С. 114-118.
5. *Душенин Ю.В., Нагучев Д.Ш., Рыбачек М.С.* К возможности применения параметрических излучателей в приборах медицинской ультразвуковой диагностики // Известия ТРТУ. – 1998. – № 4 (10). – С. 157-158.
6. *Барник В.Р., Вендт Г., Каблов Г.П., Яковлев А.Н.* Гидролокационные системы вертикального зондирования дна / Под ред. А.Н. Яковлева. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 1992. – 218 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.П. Заграй.

Душенин Юрий Владимирович – Научное конструкторское бюро цифровой обработки сигналов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: dyv-dsp@tgn.sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634312350; начальник научно-исследовательской лаборатории.

Гурский Вадим Витальевич – e-mail: dsp@tgn.sfedu.ru; начальник научно-исследовательского сектора; к.т.н.

Dushenin Yuri Vladimirovich – SFedU Research and Design Bureau of Digital Signal Processing – Federal State-Owned Educational Autonomous Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»; e-mail: dyv-dsp@tgn.sfedu.ru; 22, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634312350; head of research and development laboratory.

Goorskey Vadim Vital'evich – e-mail: dsp@tgn.sfedu.ru; head of research and development sector; cand. of eng. sc.

УДК 534.2

И.Б. Есипов, И.И. Сизов, С.П. Тарасов

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АНТЕННА КАК НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЧЕРНОМОРСКОМ ПОЛИГОНЕ*

Приводятся результаты предварительных испытаний мощной параметрической антенны на полигоне Сухумского гидрофизического института. Этот новый экспериментальный акустический инструмент, действующий на принципах нелинейной акустики, предназначен для волноводных исследований в море основных гидрофизических характеристик в полосе частот 0,3–3 кГц. Чрезвычайно узкая направленность излучения акустических сигналов во всем частотном диапазоне (2° в вертикальной плоскости, 8° – в горизонтальной) согласуется с условием селективного возбуждения мод черноморского волновода в этой полосе частот. Показано, что первая мода широкополосного акустического сигнала в черноморском волноводе может быть сжата более чем в 25 раз с соответствующим ростом интенсивности при распространении на дистанцию более 500 км. Особенности

* Исследование было выполнено при поддержке Международным научно-техническим центром (проект МНТЦ 3770) и Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ 13-02-90300).