

Расчет основных характеристик параметрической излучающей антенны

А. В. Вагин, А. С. Воротынцева✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ avorotynceva@yandex.ru

Аннотация. Представлен расчет основных характеристик параметрической излучающей антенны при заданных сигналах с частотами накачки 86 кГц – для тонального сигнала, 87...97 кГц – для сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и сигнала разностной частоты 1...11 кГц (сигнал с ЛЧМ). Выполнено построение характеристик направленности на частотах накачки, на разностной и среднегеометрической частотах зондирующих сигналов. Приведены рекомендации по выбору типа и материалов электроакустических преобразователей, на основе которых построена параметрическая излучающая антенна. Полученные результаты могут применяться на практике при проектировании и разработке гидроакустических средств вертикального зондирования дна с параметрическим режимом работы.

Ключевые слова: параметрический излучатель, частоты накачки, разностная частота

Для цитирования: Вагин А. В., Воротынцева А. С. Расчет основных характеристик параметрической излучающей антенны // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 6. С. 17–23. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-17-23.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Calculation of the Principal Characteristics of a Parametric Radiating Antenna

A. V. Vagin, A. S. Vorotyntseva✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ avorotynceva@yandex.ru

Abstract. Presents the calculation of the main characteristics of the parametric radiating antenna for the given signals with pumping frequencies of 86 kHz for a tone signal, 87...97 kHz for a signal with linear frequency modulation (LFM) and a signal with a difference frequency of 1..11 kHz (LFM signal). The construction of the directivity characteristics at the pumping frequencies, at the difference and geometric mean frequency of the probing signals is performed. Recommendations are given for the selection of the type and materials of electroacoustic transducers, on the basis of which the parametric radiating antenna is built. The obtained results can be used in practice in the design and development of hydroacoustic means of vertical bottom probing with a parametric operating mode.

Keywords: parametric radiator, pump frequencies, difference frequency

For citation: Vagin A. V., Vorotyntseva A. S. Calculation of the Principal Characteristics of a Parametric Radiating Antenna // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 6. P. 17–23. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-17-23.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Стремительное развитие промышленности, наращивание объемов производства и исследований дна Мирового океана гидроакустическими средствами ведет к необходимости со-

вершенствования существующих средств и разработке новых, повышающих эффективность гидрографических и подводных инженерно-геологических работ. В настоящее время в изуче-

нии морских пространств особенно востребовано исследование донной поверхности, в том числе структуры донного грунта [1].

Указанные задачи решаются при помощи средств вертикального зондирования дна – промерной эхолот, акустический профилограф донного грунта и др. К основным техническим характеристикам таких средств относятся рабочая глубина и разрешающая способность по дистанции. Увеличение рабочей глубины возможно при увеличении размеров гидроакустической антенны, мощности излучения, а также при применении широкополосных зондирующих сигналов и оптимальном решении задач их обработки [1], [2]. При этом имеется два существенных ограничения: линейные акустические антенны, рассчитанные на измерение больших глубин с приемлемыми массогабаритными характеристиками (МГХ) имеют ширину характеристики направленности (ХН) более 10° [3], что не может обеспечить высокую точность получаемой гидролокационной информации и разрешающую способность по дистанции, а также при определении глубин более 2000 м имеют рабочую частоту в звуковом диапазоне частот, что в сочетании с большой мощностью излучаемого сигнала снижает демаскировку носителя гидроакустического средства. Увеличение размеров гидроакустической антенны не всегда соответствует требованиям, предъявляемым к МГХ гидроакустической системы ввиду ограниченных возможностей их носителей. Для обеспечения высокой разрешающей способности по дистанции необходимо иметь антенну с узким главным максимумом ХН при соблюдении приемлемых МГХ. Уменьшение ширины главного максимума ХН возможно при использовании высоких рабочих частот, при этом уменьшается определяемая рабочая глубина, поскольку акустические сигналы высоких частот быстро затухают в водной среде [4]. Указанное противоречие разрешается применением параметрических антенн, работа которых основана на нелинейном взаимодействии излучаемых акустических волн в водной среде, называемых частотами накачки. Известно [5], что при использовании параметрического режима излучения можно реализовать ширину ХН до 4° с практически полным отсутствием боковых лепестков при приемлемых размерах антенны. При этом рабочая разностная частота составляет единицы килогерц, что увеличивает определяемую рабочую глубину. Таким образом, параметрические антенны – это

перспективная альтернатива линейным антеннам при построении излучающих антенн гидроакустических средств вертикального зондирования дна.

Принцип функционирования параметрической антенны заключается в следующем: в генераторном устройстве одновременно формируются сигналы двух высоких частот, которые подаются на акустическую антенну. Вследствие нелинейного взаимодействия в воде сигналов накачки возникает излучение на разностной частоте и гармониках. Практический интерес имеет сигнал разностной частоты.

Из теории параметрических излучающих антенн [5] известны следующие свойства таких систем:

- ХН на разностной частоте имеет практически такую же ширину, как на частотах накачки;
- уровень боковых лепестков ХН на разностной частоте приблизительно в 2 раза (в децибелах) ниже, чем на частотах сигнала накачки;
- ширина ХН на разностной частоте практически не меняется при изменении разностной частоты.

Таким образом, с помощью параметрической системы можно сформировать высоконаправленный низкочастотный сигнал (как правило в диапазоне частот 1...25 кГц [6]), используя сравнительно небольшой раскрыв физически размещаемой на носителе акустической антенны.

Существенным недостатком параметрических антенн служит низкий коэффициент преобразования энергии. Сигнал (по акустическому давлению) на разностной частоте составляет 0.2...2.0 % от уровня сигналов накачки [5].

Как уже было отмечено, повышению точности также способствует применение сложных (широкополосных) зондирующих сигналов. Эффективность использования сложных зондирующих сигналов в гидроакустических средствах активной локации отражена в [7]–[11].

Целью статьи служит выполнение расчета основных характеристик параметрической излучающей антенны (ПИА).

Расчет основных характеристик ПИА. Пусть заданы следующие характеристики ПИА: частоты накачки f_1 и f_2 соответственно имеют значения 86 кГц (тональный сигнал) и 87...97 кГц (широкополосный сигнал с линейной частотной модуляцией – ЛЧМ). При этом разностная частота $F = 1...11$ кГц (ЛЧМ-сигнал).

На первом этапе рассчитаем ХН антенны. Геометрия раскрытия рабочей поверхности – диск. Задавая значение ширины главного максимума ХН на уровне 0.707 от максимального значения по давлению

нию на разностной частоте $\Delta\theta_{0.7} = 2^\circ$, по известной средней частоте накачки $f = (f_1 + f_2)/2 = 89$ кГц, определим волновой размер антенны как поршневого излучателя:

$$\Delta\theta_{0.7} \approx 30c/(fa),$$

где $\Delta\theta_{0.7}$ – ширина главного максимума ХН на уровне 0.707 от максимального значения по давлению; $c = 1500$ – скорость звука, м/с; f – средняя частота накачки; a – радиус диска, м.

Отсюда получим $a = 0.253$ м.

ХН антенны в общем случае – величина комплексная и зависит от координат в угломестной и азимутальной плоскостях. В принятой конфигурации раскрыва (диск) поле антенны имеет осевую симметрию и зависит только от угла места θ , в соответствии с чем ХН в общем виде может быть рассчитана по формуле [12]

$$R(\theta) = \frac{p(\theta)}{p(\theta_{\max})},$$

где $p(\theta)$, $p(\theta_{\max})$ – давления, развиваемые антенной в произвольном и фиксированном направлениях, $\theta_{\max}$ – направление максимального излучения.

Известно [12], что ХН антенны круглого раскрыва определяется следующим выражением:

$$R(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin(\theta))}{(ka \sin(\theta))}, \quad (1)$$

где J_1 – функция Бесселя первого рода первого порядка; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $\lambda = c/f$ – длина волны.

Для построения ХН на разностной частоте используем метод волновых фронтов, в соответствии с которым ХН на разностной частоте F можно описать выражением [13]

$$R_F(\theta) = |R_{f_1}(\theta)R_{f_2}(\theta)|, \quad (2)$$

где $R_F(\theta)$ – ХН на разностной частоте; $R_{f_1}(\theta)$ – ХН на частоте накачки f_1 ; $R_{f_2}(\theta)$ – ХН на частоте накачки f_2 .

По (1) построим ХН для частот накачки f_1 и f_2 , средней частоты накачки f , по (2) – ХН на разностной частоте F и на среднегеометрической разностной частоте $F_m = \sqrt{F_{\min}F_{\max}}$, где, в свою очередь, $F_{\min} = 1$ кГц и $F_{\max} = 11$ кГц – крайние частоты разностного сигнала с ЛЧМ.

На рис. 1 показана графическая зависимость давления, развиваемого антенной от угла (ХН) для частот накачки f_1 и f_2 , на рис. 2 – для средней частоты накачки f и разностной частоты F , на рис. 3 – для крайних частот накачки ЛЧМ-сигнала f_2 , где $f_{2\min} = 87$ кГц и $f_{2\max} = 97$ кГц, и на рис. 4 – для среднегеометрической разностной частоты F_m .

Прямыми горизонтальными линиями на рис. 1–4 показаны уровень 0.707 от максимального значения (черная горизонтальная пунктирная линия) по давлению и уровень первого бокового лепестка (зеленая горизонтальная штрихпунктирная линия).

Из построенных ХН видно, что ширина главного максимума на разностной частоте составляет около 1.41° (рис. 2), на среднегеометрической разностной частоте – около 1.43° (рис. 4) при практическом отсутствии боковых лепестков (не более 1.5 % от значения главного максимума ХН); ширина ХН на средней частоте накачки $f = 89$ кГц составляет 2° (рис. 2), на частотах накачки $f_1 = 86$ кГц и $f_2 = 92$ кГц соответственно 2.07° и 1.94° (рис. 1) при одинаковом уровне боковых лепестков, составляющем не более 13.5 % от значения главного максимума ХН. Из теории параметрических антенн известно [5], что ширина главного максимума ХН на разностной частоте примерно в $\sqrt{2}$ раз меньше ширины на средней частоте накачки, что соответствует приведенному расчету.

Необходимо отметить, что реальная антенна не имеет сплошного раскрыва, а является дискретной – многоэлементной антенной решеткой с круглой апертурой. Причем поскольку параметрическая антенна излучает две частоты накачки, она должна быть выполнена в виде двух вложенных подрешеток, где одна антенная подрешетка работает на частоте f_1 , а другая – на f_2 .

Определим расстояние d между элементами (отдельными преобразователями), формирующими антенну. Из общей теории гидроакустических антенн известно [2], [12], что во избежание появления дополнительных максимумов, сопоставимых по уровню с основным, межцентровое расстояние между элементами должно составлять половину длины волны: $d \leq \lambda/2$. Так как реальный отдельный преобразователь имеет свои геометрические размеры, межцентровое расстояние между соседними элементами в параметрической антенне определяется по средней частоте сигнала накачки [5]:

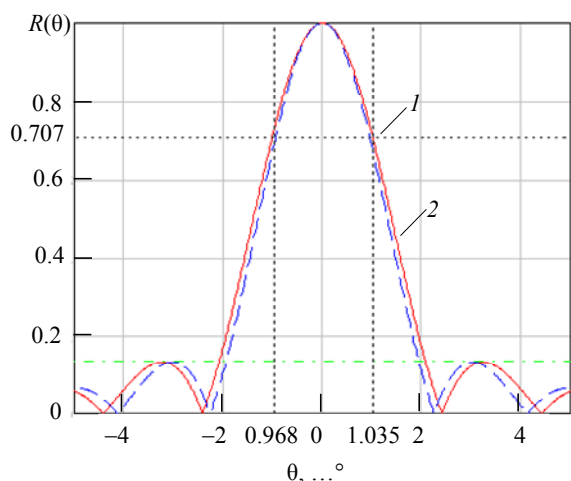


Рис. 1. Характеристика направленности на частотах накачки: кривая 1 – $f_1 = 86$ кГц, кривая 2 – $f_2 = 92$ кГц
Fig. 1. Directional characteristics at pumping frequencies: curve 1 – $f_1 = 86$ kHz, curve 2 – $f_2 = 92$ kHz

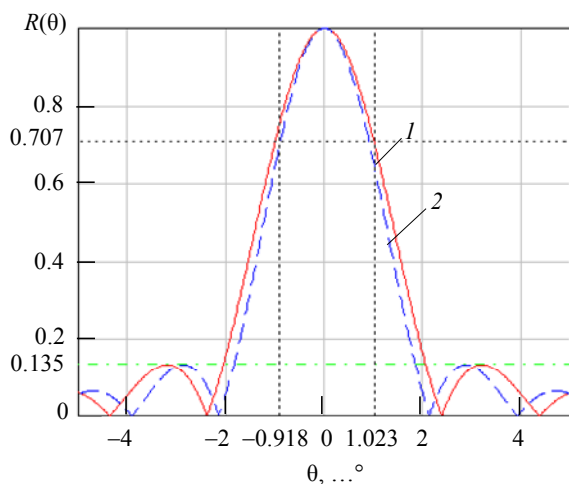


Рис. 3. Характеристика направленности на крайних частотах ЛЧМ-сигнала накачки: кривая 1 – $f_{2\min} = 87$ кГц, кривая 2 – $f_{2\max} = 97$ кГц
Fig. 3. Directional characteristics at the extreme frequencies of the LFM pump signal: curve 1 – $f_{2\min} = 87$ kHz, curve 2 – $f_{2\max} = 97$ kHz

$$d = \frac{2c}{f_1 + f_2} = 0.017 \text{ м.}$$

Межцентровое расстояние d ограничивает размеры преобразователей накачки – таким образом, диаметры преобразователей накачки выбираются равными 0.017 м. Ранее определен волновой размер рабочей поверхности – радиус диска $a = 0.253$ м, следовательно, диаметр рабочей поверхности составит $D = 2a = 0.506$ м. Исходя из известного межцентрового расстояния и диаметра рабочей поверхности, определим количество преобразователей: $m = 664$. Как было отмечено ранее, параметрическая антенна содержит две вложенные подрешетки (по 332 преобразователя в каждой), и имеет круглую апертуру. На рис. 5

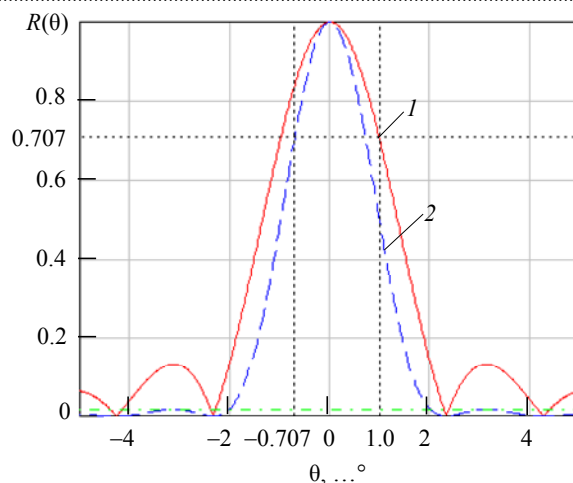


Рис. 2. Характеристика направленности: кривая 1 – на средней частоте накачки $f = 89$ кГц, кривая 2 – на разностной частоте $F = 6$ кГц
Fig. 2. Directional characteristics: curve 1 – at the average pumping frequency $f = 89$ kHz, curve 2 – at the difference frequency $F = 6$ kHz

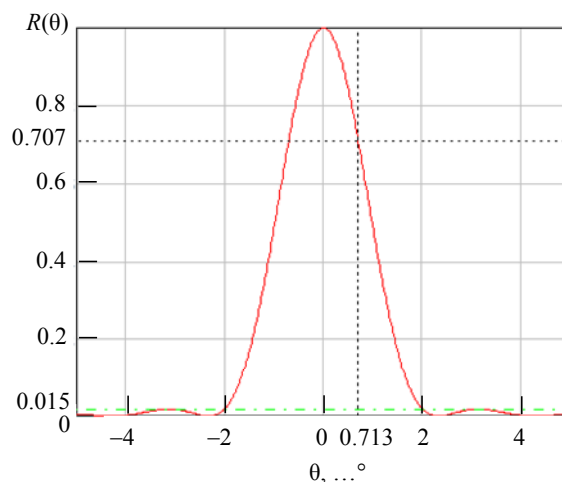


Рис. 4. Характеристика направленности на средне-геометрической разностной частоте $F_m = 3.317$ кГц
Fig. 4. Directional characteristics at the geometric mean difference frequency $F_m = 3.317$ kHz

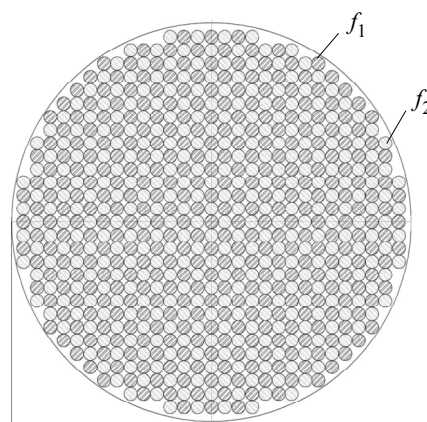


Рис. 5. Расположение преобразователей в параметрической излучающей антенне
Fig. 5. Arrangement of transducers in a parametric radiating antenna

Основные параметры антенны
Principal antenna parameters

Параметр	Значение
Тип раскрыва	Плоский диск
Геометрические размеры	Ø 0.506 м
Количество элементов	332 в каждой подрешетке
Ширина ХН на средней частоте накачки f	2.0°
Ширина ХН на частоте накачки f_1	2.07°
Ширина ХН на частоте накачки f_2	1.94°
Ширина ХН на среднегеометрической разностной частоте F_m	1.43°
Ширина ХН на разностной частоте F	1.41°
Ширина ХН на крайних частотах ЛЧМ-сигнала накачки $f_{2\min} = 87$ кГц и $f_{2\max} = 97$ кГц	2.05 и 1.84°
Уровень бокового поля на частотах накачки, не более	13.5 %
Уровень бокового поля на разностной частоте, не более	1.5 %

показан эскиз параметрической антенны с примерным расположением элементов, где темным обозначены преобразователи накачки, работающие на частоте $f_1 = 86$ кГц, светлым – преобразователи, реализующие излучение на частоте $f_2 = 92$ кГц.

Выбор электроакустических преобразователей. Источник сигнала параметрической антенны представляет собой две вложенные подрешетки, где одна из них излучает частоту накачки $f_1 = 86$ кГц, а другая – частоту $f_2 = 92$ кГц. Обеспечить эффективное решение такой задачи можно с помощью стержневых пьезокерамических преобразователей, реализующих продольный пьезоэффект.

Стержневые преобразователи в зависимости от конкретной поставленной задачи могут иметь три различные конструкции: без накладок; составной с одной передней накладкой (излучающей/приемной) и составной с двумя накладками (передней и тыльной – частотно-понижающей). Выбор конструкции излучающего преобразователя зависит от предъявляемых к нему требований, основные из которых следующие:

- резонансная (рабочая) частота f_p ;
- необходимая удельная акустическая мощность.

Для преобразователя, реализующего колебания с частотой $f < 150$ кГц, целесообразно применять конструкцию с двумя металлическими накладками.

В качестве активного материала выберем пьезокерамику. Существующие промышленные составы пьезокерамики (ЦТСНВ-1, ЦТБС-3,

ЦТС-19, ЦТС-23 и прочие) обладают различными механическими и электрическими свойствами, позволяют изготавливать из них активные элементы преобразователей необходимой конфигурации для широкого диапазона частот. Специфические условия, вытекающие из необходимости получения высокоинтенсивных сигналов накачки, требуют анализа свойств пьезокерамики в условиях повышенных механических и электрических нагрузок. Основные требования к пьезокерамике для преобразователей накачки можно сформулировать следующим образом:

- материал должен обладать возможно большей пьезоактивностью, так как требования уменьшения МГХ создают определенные трудности при подведении большой электрической мощности к пьезопреобразователю;

- механические и диэлектрические потери должны быть минимальными, так как они вызывают разогрев пьезоэлемента и приводят к уменьшению механоакустического и электромеханического КПД;

- пьезоматериал должен иметь хорошую стабильность свойств во времени и при воздействии сигналов большой амплитуды и мощности.

Следовательно, критерием выбора пьезоматериала для преобразователя накачки должна быть совокупность параметров, обеспечивающая максимальную акустическую мощность при заданной напряженности электрического поля и эффективность электромеханического преобразования. В [12], [14] показано, что наиболее подходящий материал – пьезокерамика ЦТБС-3, использование этого состава для преобразователей накачки параметрических антенн позволяет реализовать требуемую акустическую мощность. Диэлектрические, пьезоэлектрические и механические свойства пьезокерамики состава ЦТБС-3 обеспечивают изготовление преобразователя накачки с приемлемым КПД, который не требует дополнительных решений для уменьшения нагрева вследствие роста потерь.

Акустическое сопротивление материала излучающей (передней) накладки $\rho_n c_n$ должно быть близко к акустическому сопротивлению воды $\rho_v c_v$ для наилучшего согласования с рабочей средой. Этому требованию отвечает титановый сплав (например, ВТ1-0), который имеет следующие преимущества:

- высокая коррозионная стойкость;
- легкость;
- жаростойкость;

- высокая прочность, в том числе сварных соединений;
- акустическое сопротивление близко к существующему пьезокерамике.

Однако применение титановых сплавов ограничивает ряд недостатков, в числе которых:

- низкая обрабатываемость (высокая вязкость);
- при термической резке образуется прочный поверхностный слой;
- необходимость сварки в защитной среде газа (аргона);
- высокая стоимость;
- образование гальванической пары со сталью.

Альтернативой дорогим и сложно обрабатываемым титановым сплавам служат алюминиевые сплавы, имеющие следующие преимущества:

- легкость;
- прочность при специальной обработке;
- коррозионная стойкость в пресной воде в условиях сохранности оксидной пленки;
- высокая электропроводность и теплопроводность;
- хорошая обрабатываемость (механическая обработка);
- относительная дешевизна в сравнении с титановыми сплавами.

К недостаткам алюминиевых сплавов относятся:

- низкое сопротивление к усталостным нагрузкам;

- высокая коррозия в морской воде;
- необходимость сварки в защитной среде аргона;
- высокий температурный коэффициент линейного расширения (в сравнении с пьезокерамикой).

Исходя из преимуществ и недостатков указанных металлов, в качестве материала излучающей накладки целесообразно выбрать титановый сплав.

Тыльная накладка должна быть выполнена из более тяжелого и коррозионностойкого металла – данному требованию удовлетворяет нержавеющая сталь, к примеру X18H9T.

Заключение. В статье представлен расчет основных параметров параметрической излучающей антенны при заданных частотах накачки 86 кГц (тональный сигнал), 87...97 кГц (сигнал с ЛЧМ), разностной частоты 1...11 кГц (сигнал с ЛЧМ). Основные рассчитанные параметры антенны приведены в таблице. Даны рекомендации по выбору типа и материалов электроакустических преобразователей, комплектующих антенну, – рекомендуется использовать стержневой преобразователь, содержащий состав пьезокерамики ЦТБС-3, в качестве материала излучающей накладки выбран титановый сплав, тыльные накладки целесообразно выполнить из нержавеющей стали.

Полученные результаты могут применяться на практике при проектировании и разработке гидроакустических средств вертикального зондирования дна с параметрическим режимом работы.

Список литературы

1. Богородский А. В., Островский Д. Б. Гидроакустические навигационные и поисково-обследовательские средства. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 244 с.
2. Смарышев М. Д., Добровольский Ю. Ю. Гидроакустические антенны. Л.: Судостроение, 1984. 304 с.
3. Судовые эхолоты / А. А. Хребтов, К. А. Виноградов, В. Н. Кошкарёв, Б. М. Манулис, Б. А. Осюхин. Л.: Судостроение, 1982. 232 с.
4. Андреева И. Б. Физические основы распространения звука в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 190 с.
5. Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. 264 с.
6. Вагин А. В., Воротынцева А. С. Гидроакустическое устройство профилирования донного грунта с синтезированной апертурой // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 1. С. 78–86.
7. Бровин А. В. Средства и методы подводных исследований прибрежной зоны // Морской сб. 2011. № 5 (1970). С. 33–41.
8. Карабанов И. В., Миронов А. С. Алгоритмы обработки гидроакустических сигналов. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. ГУ, 2018. 140 с.

9. Параметрический эхолот-профилограф с линейной частотной модуляцией зондирующего сигнала / В. И. Каевецер, А. П. Кривцов, И. В. Смольянинов, А. В. Элбакидзе // Журн. радиоэлектроники. 2021. № 11. С. 1–9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov21/11/text.pdf> (дата обращения: 29.04.2024).
10. Воронин В. А., Тарасов С. П., Тимошенко В. И. Использование методов нелинейной акустики в современных гидролокационных технологиях // Изв. ТРТУ. 2005. № 2(46). С. 51–56.
11. Вагин А. В., Воротынцева А. С. Расчет энергетических характеристик гидролокационных систем вертикального зондирования при учете сложности излучаемого сигнала // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 2. С. 19–25.
12. Свердлин Г. М. Гидроакустические преобразователи и антенны. Л.: Судостроение, 1980. 232 с.
13. Железный В. Б. Об описании параметрических излучающих антенн на основе модели волновых фронтов // Гидроакустика. 2019. № 4(40). С. 5–12.

14. Васильевский В. В., Лепендин Л. Ф., Тарасова Г. Б. Об амплитудной неустойчивости свойств пьезокерамики в параметрических гидроакустических излучателях //

Тр. II Всесоюз. науч.-техн. совещания «Нелинейная гидроакустика-76». Таганрог: ТРТИ, 1976. С. 82–85.

Информация об авторах

Вагин Антон Владимирович – ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: av.vagin@bk.ru

Воротынцева Алена Сергеевна – аспирант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: avorotynceva@yandex.ru

References

1. Bogorodskij A. V., Ostrovskij D. B. Gidroakusticheskie navigacionnye i poiskovo-obsledovatel'skie sredstva. SPb.: Izd-vo SPbGETU «LjETI», 2009. 244 s. (In Russ.).

2. Smaryshev M. D., Dobrovol'skij Ju. Ju. Gidroakusticheskie anteny. L.: Sudostroenie, 1984. 304 s. (In Russ.).

3. Sudovye jeholoty / A. A. Hrebtov, K. A. Vinogradov, V. N. Koshkarev, B. M. Manulis, B. A. Osjuhin. L.: Sudostroenie, 1982. 232 s. (In Russ.).

4. Andreeva I. B. Fizicheskie osnovy rasprostraneniya zvuka v okeane. L.: Gidrometeoizdat, 1975. 190 s. (In Russ.).

5. Novikov B. K., Rudenko O. V., Timoshenko V. I. Nelinejnaja gidroakustika. L.: Sudostroenie, 1981. 264 s. (In Russ.).

6. Vagin A. V., Vorotynceva A. S. Gidroakusticheskoe ustrojstvo profilirovaniya donnogo grunta s sintezirovannoj aperturoj // Izv. vuzov Rossii. Radioelektronika. 2023. T. 26, № 1. S. 78–86. (In Russ.).

7. Brovin A. V. Sredstva i metody podvodnyh issledovanij pribrezhnoj zony // Morskoj sb. 2011. № 5 (1970). S. 33–41. (In Russ.).

8. Karabanov I. V., Mironov A. S. Algoritmy obrabotki gidroakusticheskikh signalov. Habarovsk: Izd-vo Tihoookean. GU, 2018. 140 s. (In Russ.).

9. Parametricheskij jeholot-profilograf s linejnoy chastotnoj moduljaciej zondirujushhego signala / V. I. Kaeviser,

A. P. Krivcov, I. V. Smol'janinov, A. V. Jelbakidze // Zhurn. radioelektroniki. 2021. № 11. S. 1–9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov21/11/text.pdf> (data obrashhenija: 29.04.2024). (In Russ.).

10. Voronin V. A., Tarasov S. P., Timoshenko V. I. Ispolzovanie metodov nelinejnoy akustiki v sovremennyh gidrolokacionnyh tehnologijah // Izv. TRTU. 2005. № 2(46). S. 51–56. (In Russ.).

11. Vagin A. V., Vorotynceva A. S. Raschet jenergeticheskikh harakteristik gidrolokacionnyh sistem vertikal'nogo zondirovaniya pri uchte slozhnosti izluchaemogo signala // Izv. SPbGETU «LETI». 2025. T. 18, № 2. S. 19–25. (In Russ.).

12. Sverdlin G. M. Gidroakusticheskie preobrazovateli i anteny. L.: Sudostroenie, 1980. 232 s. (In Russ.).

13. Zheleznyj V. B. Ob opisanii parametricheskikh izluchajushhih antenn na osnove modeli volnovyh frontov // Gidroakustika. 2019. № 4(40). S. 5–12. (In Russ.).

14. Vasilovskij V. V., Lependin L. F., Tarasova G. B. Ob amplitudnoj nestabil'nosti svojstv p'ezokeramiki v parametricheskikh gidroakusticheskikh izluchateljah // Tr. II Vsesojuzn. Nauch.-tehn. soveshhanija «Nelinejnaja gidroakustika-76». Taganrog: TRTI, 1976. S. 82–85. (In Russ.).

Information about the authors

Anton V. Vagin – assistant of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology St. Petersburg Electrotechnical University «LETI».

E-mail: av.vagin@bk.ru

Alena S. Vorotyntseva – postgraduate student of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology Electrotechnical University «LETI».

E-mail: avorotynceva@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23.01.2025; принята к публикации после рецензирования 16.04.2025; опубликована онлайн 30.06.2025.

Submitted 23.01.2025; accepted 16.04.2025; published online 30.06.2025.