УДК 534.23: 629.127

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДНЫЕ АНТЕННЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКЕАНА

Ю.В. Мальцев, С.Е. Прокопчик

Дальневосточный государственный университет¹

Изложены основы теории нетрадиционных для современной гидроакустики волноводных антенн, которые обладают целым рядом интересных с практической точки зрения возможностей, благодаря которым находят все более широкое применение в гидроакустической аппаратуре различного назначения. Для пояснения принципов работы и особенностей таких антенн представлена одна из расчетных моделей. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований ряда разработанных авторами образцов антенн. Обсуждаются возможности их практического использования в подводных технических средствах исследования океана.

введение

Неотъемлемой частью существующих и разрабатываемых в настоящее время автономных подводных роботизированных технических средств исследования океана является гидроакустическая аппаратура различного класса и назначения. Одна часть такой аппаратуры обеспечивает собственно «жизнедеятельность» подводного технического средства, включая его навигацию, управление, связь, другая выполняет исследовательские функции: измерение параметров среды, профилирование донных осадков, обследование поверхности дна, зондирование толщи водной среды и другие. Работа такой аппаратуры напрямую связана с надежностью и эффективностью входящих в ее состав гидроакустических антенн. Эффективность гидроакустической антенны является интегральной характеристикой, включающей целый ряд технических параметров и требований, предъявляемых к ней. В связи с возрастающей сложностью гидроакустической аппаратуры, применением сложных зондирующих и информационных сигналов, программноаппаратных комплексов по их обработке к гидроакустическим антеннам также предъявляюттребования. ся повышенные Специфической особенностью гидроакустических антенн является то, что они не только обеспечивают избирательное излучение и прием в заданных секторах пространства в требуемом частотном диапазоне, но и преобразователями являются электрической энергии в акустическую. К наиболее сложным задачам в деле создания гидроакустической антенной техники являются задачи обеспечения широкой полосы пропускания амплитудно-частотной характеристики антенны, достаточной для применения широкополосных сигналов и поддержания постоянства формы характеристики направленности в рабочей полосе частот антенны. Для решения этих задач разработчикам зачастую приходится прибегать к поиску нестандартных принципов формирования акустических полей и нетралиционных конструкторских решений. К одному из типов антенн, подпадающих под определение «нетрадиционные», можно отнести и обсуждаемые в данной работе гидроакустические волноводные антенны. Гидроакустические волноводные антенны относятся к классу антенн бегущей волны, давно и успешно применяемых в радиолокации и радиосвязи [1]. Примерами антенн бегущей волны могутслужить диэлектрические антенны, антенны с длинными щелями в волноводах, спиральные антенны и различные типы антенн поверхностных волн. Как правило, термин «антенна бегущей волны» является синонимом непрерывного источника, хотя на деле многие антенные решетки из дискретных элементов (в том числе гидроакустические) можно удовлетворительно аппроксимировать токами и полями бегущей волны. В гидроакустике при классифи-

¹ 690950, Владивосток, ул. Суханова, 8. Тел.: (4232) 51-53-25. E-mail: halab@ ifit.phys.dvgu.ru, pse@phys.dvgu.ru

кашии антенны как антенны (излучателя) бегущей волны всегда следует добавлять определение «волноводная». Это связано с тем, что основным, определяющим свойства такого излучателя (антенны), элементом конструкции является твердая волноводная структура. Несмотря на то что акустические и электромагнитные процессы являются волновыми и в ряде случаев описываются аналогичными выражениями природа электромагнитных и акустических волн различна, и это различие сказывается на свойствах волн, особенностях их распространения и на реальных конструкциях антенн. Что касается волноводных антенн, физические принципы их работы существенно отличаются, а существующие теория и методы расчета, не говоря уже о принципах реализации, совершенно различны. Физические принципы функционирования гидроакустических волноводных антенн основаны на теории распространения акустических волн в упругих средах, а в частности в волноводных структурах, погруженных в жидкость. Обычно волноводная структура (по типу, в самом простом варианте, это может сплошной цилиндрический стержень или пластина) возбуждается с торца, и в ней, в зависимости от способа возбуждения, соответственно возбуждается и начинает распространяться спектр нормальных волн. Нормальные волны распространяются в вол-

новоде, погруженном в жидкость, и, если при этом C_{φ} (фазовая скорость волны) больше скорости звука в самой жидкости C_0 , ее энергия по мере распространения вдоль волновода будет излучаться в жидкость через его боковую поверхность под определенным углом, который определяется соотношением:

$$\gamma = \arccos \frac{C_o}{C} = \arccos \frac{k}{k_0}.$$

Вытекающая волна является бегущей волной, энергия которой непрерывно уменьшается по экспоненциальному закону за счет излучения. Если длина волновода ограничена, часть энергии отражается от торца и начинает распространяться по волноводу в обратном направлении, также вытекая через боковую поверхность в окружающее пространство и создавая обратную бегущую волну и формируя тыльное излучение, уровень которого определяется длиной волновода. Волноводное звено в конструкции гидроакустического излучателя выполняет функцию не только диаграммоформирующего устройства, но и обеспечивает акустическое согласование со средой пьезоэлектрической системы возбуждения и кроме этого, как будет показано ниже, может оказывать существенное влияние на амплитудно-частотную характеристику излучателя в целом. Форма звукового поля, создаваемого волноводным излучателем, зависит от материа-



Рис. 1. Принцип действия гидроакустических волноводных антенн на вытекающих волнах

52 ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2010. № 2(10)

ла, геометрической формы и размеров волноводной структуры, а также способов и точек ее возбуждения. При распространении рабочей волны в линейной излучающей структуре со скоростью $C_{\varphi} > C_0$ может быть сформировано несколько типов диаграмм направленности: воронкообразная или коническая для стержневых цилиндрических волноводов (рис. 1, кривые 2,3) и V-образная для плоских волноводов (кривая 1).

Основы теории излучения волноводных структур, погруженных в жидкость

Простейшая модель гидроакустической волноводной антенны (ВА) представляет собой преобразователь, нагруженный на пассивный цилиндрический волновод достаточной длины с торцовой поверхности. Цилиндрический упругий волновод является одной из наиболее распространенных излучающих структур, используемых в конструкциях волноводных гидроакустических антенн. Это связано с широкими возможностями его практического использования и конструктивной простотой, кроме того, он удобен для теоретического исследования, так как возможно относительно простое численное решение соответствующей ему граничной задачи при анализе полей излучения. Для волновода цилиндрического возможна точная запись дисперсионных уравнений, гарантирующая адекватность применяемой математической модели для реальной излучающей структуры.

Методика расчета, разработанная для цилиндрических волноводов, была распространена на излучатели со структурами иной геометрии, например плоскими, с различным типами нагружения: двусторонним или односторонним. Отличия связаны с определением постоянных распространения рабочей волны в волноводной структуре, которые находятся из решения соответствующих граничных задач, которые известны.

Поле излучения ВА формируется нормальными волнами, энергия которых непрерывно уменьшается за счет излучения. В общем случае амплитуднофазовое распределение нормальной компоненты колебательной скорости вдоль оси структуры достаточной длины, когда отражение от торца несущественно, можно представить суммой бегущих волн, возбужденных в стержне [2,3]:

$$\dot{\xi}(z) = \sum_{n=0}^{N} A_n e^{-i\kappa_n z}, \qquad (1)$$

где $\kappa_n = \kappa_{1n} + i\kappa_{2n}$ — волновое число или постоянная распространения нормальной волны. Вещественная часть волнового числа κ_{1n} задает распределение фазы

$$\kappa_{1n} = \omega / C_{\omega_n}, \qquad (2)$$

здесь C_{φ_n} — фазовая скорость нормальной волны, ω — круговая частота.

Величина мнимой части волнового числа к_{2n} является коэффициентом затухания нормальной волны за счет излучения энергии в жидкость, который определяет распределение амплитуды функции возбуждения по эффективно излучающей части волноводной структуры.

Расчет основных параметров волноводного излучателя, таких как характеристика направленности, излучаемая мощность, входное сопротивление, входной электрический импеданс, потребляемая электрическая мощность, электрическая мощность, электроакустический к.п.д., чувствительность, полоса рабочих частот, требует определения постоянных распространения К, нормальных волн, дающих основной вклал в излучение ВА. Излучающая структура на практике имеет длину, достаточную для излучения практически всей энергии через боковую поверхность, или хорошо согласованную нагрузку на конце, исключающую отражение. Это дает возможность существенно упростить задачу расчета $\kappa_n = \kappa_{1n} + i\kappa_{2n}$ и определить их как корни дисперсионного уравнения, получаемого из решения граничной задачи о распространении нормальных волн в бесконечно длинном волноводе, находящемся в жидкости [2,3]:

$$\frac{\rho_0}{\rho} D_1 H_0^{(2)}(x_3) - x_3 H_1^{(2)}(x_3) D_2 = 0,$$
(3)

где

$$D_{1} = x^{2}(v^{2} - \alpha^{2})F_{1}F_{2};$$

$$D_{2} = (1 - 2\alpha^{2})^{2}J_{0}(x_{1})F_{2} + 4\alpha^{2}(v^{2} - \alpha^{2})J_{0}(x_{2})F_{1} - -2(v^{2} - \alpha^{2})F_{1}F_{2};$$

 $\alpha = C_t/C_{\varphi}$, $\nu = C_t/C_l$, $n = C_t/C_0$, $x = a\omega/C_t$ – безразмерный частотный параметр;

 $x_1^2 = x^2(v^2 - \alpha^2);$ $x_2^2 = x^2(1 - \alpha^2);$ $x_3^2 = x^2(n^2 - \alpha^2);$ $F_1 = J_1(x_1)/x_1;$ $F_2 = J_1(x_2)/x_2;$ $J_0(),$ $J_1()$ – функции Бесселя нулевого и первого порядков; $H_0^{(2)}()$ – функция Ханкеля второго рода нулевого порядка; $C_l, C_i,$ – скорости продольной и поперечной волн в материале стержня и C_0 – скорость волны в жидкости, ρ_0, ρ – плотности жидкости и материала волновода, – радиус волновода.

Заметим, что уравнение $D_2(\alpha, x) = 0$ является дисперсионным уравнением Похгаммера для стержня со свободной границей [4]. Первое слагаемое в уравнении (3) описывает влияние жидкости на распространение нормальных волн в цилиндрическом волноводе. Корни трансцендентного уравнения (3) являются комплексными:

$$\alpha(x) = \alpha_1(x) + i\alpha_2(x). \quad (4)$$

Расчет корней уравнения (3) для нулевой моды удобно производить методом Мюллера [5]. В качестве нулевого приближения тогда используются вещественные корни дисперсионного уравнения для стержня со свободными границами, отвечающие нулевой моде.

Комплексность корней, соответствующих незатухающим нормальным волнам в стержнях со свободной границей, отвечающих вещественным корням уравнения $D_{2}(\alpha, x) = 0$, простой физический имеет смысл: энергия этих волн при распространении непрерывно излучается в жидкость. Вещественная часть корня позволяет определить фазовую скорость $C_{\alpha}(x) = C_t / \alpha_1(x),$ а мнимая часть $\alpha_2(x)$ – коэффициент затухания за счет потерь на излучение в воду. Зависимость комплексных постоянных распространения нормальных волн в стержневых цилиндрических волноводных структурах ОТ частотного параметра определяется следующим образом:

$$\kappa(x) = \frac{\omega}{C_t} \alpha(x) = \frac{\alpha_1(x)\omega}{C_t} + i\frac{\alpha_2(x)\omega}{C_t} + i\frac{\alpha_2(x)\omega}{C_t} = \kappa_1(x) + i\kappa_2(x).$$
(5)

На рисунках 2-5 приведены примеры расчета корней дисперсионного уравнения (3) для некоторых материалов в зависимости от безразмерного частотного параметра $x = \kappa_t a$.

Задачу анализа поля излучения ВА можно решить с помощью интегральных преобразований Фурье [6], основываясь на представлении, что основной вклад обеспечивается вытекающей нулевой продольной волной L(0,1), создающей на поверхности волновода убывающее по длине распределение нормальной компоненты колебательной скорости

$$\dot{\xi}_r = \dot{\xi}_0 e^{-\kappa_2 z} e^{i(\omega t - \kappa_1 z)}.$$
 (6)

Воспользовавшись методом стационарной фазы, можно получить выражение для амплитудной характеристики направленности (XH) цилиндрической ВА длины L в виде [2,3]:

$$R(\gamma) = \frac{\kappa_2 L}{1 - e^{-\kappa_2 L}} \cdot \sqrt{\frac{J_1^2(\kappa_0 a \cos\gamma_0) + N_1^2(\kappa_0 a \cos\gamma_0)}{J_1^2(\kappa_0 a \cos\gamma) + N_1^2(\kappa_0 a \cos\gamma)}} \frac{\cos\gamma_0}{\cos\gamma} \times \sqrt{\frac{e^{-2\kappa_2 L} - 2e^{-\kappa_2 L} \cos(\kappa_0 L(\sin\gamma_0 - \sin\gamma)) + 1}{(\kappa_2 L)^2 + (\kappa_0 L)^2(\sin\gamma_0 - \sin\gamma)^2}}.$$
(7)

Анализируя (7), нетрудно заметить, что направление главного максимума характеристики направленности γ_{Max} совпадает с углом выхода волны с поверхности излу-

чающей структуры
$$|\mathcal{R}(\gamma_0)| = 1$$

 $\gamma_{_{Max}} = \gamma_0 = \arccos \frac{C_o}{C} = \arccos \frac{k_{\phi}}{k}.$

ХН цилиндрических волноводных антенн осесимметричны, и



Рис. 2. Дисперсионные кривые фазовой скорости для металлов: 1 – алюминий, 2 – титан, 3 – олово, 4 – сталь, 5 – бронза





в зависимости от величин С_о и к, могут иметь различную форму. В реальной антенне длина волновода конечна, и волна, бегущая вдоль него, может не успеть излучиться полностью через боковую поверхность. Поэтому, достигнув торца и частично отразившись от него, она будет распространяться в обратную сторону. При этом формируется добавочный лепесток в диаграмме направленности, положение которого соответствует углу $\gamma = -\gamma_0$. Другая же часть волны, прошедшая в среду через торец, создаст еще один добавочный лепесток в направлении оси $\gamma = 0$. Уровень этих лепестков будет определяться соотношением амплитуд прямой и обратной волн, т.е. амплитудным распределением поля на поверхности структуры. При условии неполного отражения от торца волновода уровень добавочного лепестка, создаваемого обратной волной, будет равен

$$E_1 = E \cdot W \cdot e^{-\kappa_2 L},$$

где E – амплитуда волны на входе волновода; W – коэффициент отражения, тогда уровень этого лепестка определяется выражением:

$$r_{\text{go61}} = \frac{E_1}{E} = W e^{-\kappa_2 L}$$
. (8)

Амплитуда добавочного лепестка, создаваемого прошедшей через торец волной, соответствует $E_2 = E \cdot D \cdot e^{-\kappa_2 L}$, где D – коэффициент прозрачности. Уровень данного лепестка равен

$$r_{\text{go62}} = \frac{E_2}{E} = De^{-\kappa_2 L}.$$
 (9)

Из выражений (8), (9) следует, что требуемый уровень добавочных лепестков можно обеспечить соответствующим выбором длины структуры. На рис. 6 представлены примеры расчета XH для цилиндрического волновода из бронзы в полосе частот $x = 2 \div 4$. Из рисунков видно, что ДН имеет воронкообразную форму. Угол раскрыва воронки, т.е. положение максимума ДН, соответствует углу выхода нормальной волны с поверхности стержня. Благодаря дисперсии фазовой скорости происходит изменение положения главного максимума ДН. Как видно из кривых, с ростом частотного параметра основной лепесток приближается к оси антенны, что объясняется уменьшением фазовой скорости нормальной волны (рис. 2). На кривых, соответствующих частотному параметру $x \ge 3$, отсутствуют боковые лепестки, что обусловлено специфическим, спадающим к краю, распределением амплитуды функции возбуждения антенны $\xi_z(z)$. На частотах ниже x < 3 распределение колебательной скорости более равномерно, поэтому ДН более изрезана, похожа на характеристику направленности линейного отрезка с равноамплитудным возбуждением. Ширина основного лепестка ДН определяется изменением волновых размеров эффективно излучающей поверхности при изменении частоты, т.е. частотной зависимостью коэффициента затухания к2. В тех случаях, когда волновые размеры поверхности излучения сокращаются, происходит расширение основного лепестка и некоторое заплывание осевого провала.

Для всех материалов с ростом частотного параметра а ширина ДН практически сохраняется неизменной в полосе частот порядка октавы (x = 0, 9-2) за счет сохранения постоянной волновой длины эффективно излучающей поверхности структуры благодаря линейной зависимости К2 на этом участке (рис.3 и рис.5) и постоянству фазовой скорости (рис. 2 и рис.3), что характерно и для «медленных» волноводов из







Рис. 5. Частотная зависимость мнимой части постоянной распространения k_2 а для неметаллов: 1 – полистерол, 2 – оргстекло, 3 – эбонит 1, 4 – эбонит 2, 5 – сферопласт



Рис. 6. Амплитудная характеристика направленности ВА с волноводом из бронзы

эбонита (рис.7). Необходимо напомнить, что расчеты XH антенн, излучающих близко к оси, по выражению (7) недостаточно точны, но тем не менее отражают характер распределения звукового поля в дальней зоне.

Анализ дисперсионного уравнения (3) показал, что для «медленных» волноводов в низкочастотном диапазоне, применяемом в гидроакустике, в спектре продольных нормальных волн кроме вытекающей моды L(0,1) существует поверхностная волна типа Стоунли-Шолте [7,8]. Кроме того, как следует из анализа распределения осевых смещений, при поршневом типе возбуждения волновода часто создаются одинаково эффективные, эквивалентные условия для возбуждения обеих мод, по крайней мере в используемом гидроакустикой диапазоне частот. Поэтому такая волна может являться олним из основных типов волн, возникающих при возбуждении цилиндра с торца, осуществляющих перенос энергии в направлении оси и подвергающихся на его конце преобразованию в волны, не связанные с излучающей структурой, и требует учета ее влияния при расчете акустических полей, формируемых ВА.



В работе [8] лано решение такой задачи анализа комбинированным численноаналитическим методом с применением метода граничных элементов, подробно изложенного в работе [9]. Распределение колебательной скорости в узлах граничных элементов определялось аналитически из решения граничной задачи о распространении продольных нормальных волн в упругом цилиндре. Отражения волн от торца в приводимых расчетах не учитывались, так как проведенные ранее в работе [10] численные оценки позволяют ими пренебречь. По крайней мере в исследуемом частотном диапазоне коэффициент отражения не превышает 0,15, что также коррелирует с экспериментальными исследованиями полей излучения (кривая 1, рис. 8).

На рис. 8 представлены расчетные и экспериментальная диаграммы направленности макета излучателя с мелкослоистым композитным волноводом с поперечной ориентацией слоев, специально разработанным для достижения фазовой скорости волны L(0,1) чуть выше скорости звука в воде. На кривой 2 представлена диаграмма направленности на частоте, соответствующей $k_{\rm T}a = 1, 6, для$ волновода с относительной длиной L/a = 15,5, рассчитанная методом граничных элементов с учетом распределения колебательной скорости, создаваемой на его поверхности только модой L(0,1). Как видно из сравнения с экспериментальной кривой 1, диаграмма направленности существенно шире реальной. Мода Стоунли-Шолте, как видно из кривой 3, наиболее существенно влияет на форму характеристики направленности в направлении основного лепестка. Из сравнения всех результатов видно, что наилучшим образом результаты расчетов совпадают с

экспериментальными при равноамплитудном парциальном вкладе как моды L(0,1), так и моды типа Стоунли-Шолте.

Большое внимание при проектировании гидроакустической аппаратуры уделяется созданию антенн, формирующих ДН специальной формы.

Практическая реализация таких систем сложна и связана с обеспечением найденного методами синтеза сложного амплитудно- фазового распределения функции возбуждения на поверхности многоэлементных антенных решеток, что очень сложно.

Волноводные антенны весьма перспективны при решении таких задач, так как практическая реализация таких антенн существенно проще и сводится к изготовлению волновода нужной формы. В работах [11,12] решена задача анализа звукового поля для осесимметричных волноводных антенн конечной длины различной геометрии с плавно изменяющимся переменным сечением. В работе [12] использован комбинированный численно-аналитический метол с ипользованием метода граничных элементов. Распределение колебательной скорости в узлах граничных элеменов рассчитывалось аналитически с помощию кусочной аппроксимации. Расчетами показано, что форма волновода существенно влияет на акустическое поле даже при плавном ее изменении, распространяющийся когла тип волны не трансформируется в другие моды, а изменение ее постоянной распространения происходит плавно. К примеру, волноводы из одного и того же материала и одинаковых габаритов, но разной формы позволяют сформировать как довольно узкие осевые ДН, так и секторные с шириной лепестка до 140 градусов.

Волноводные антенны обратимы. Это свойство на физическом уровне обусловлено закономерностями возбуждения распространения нормальи ных волн в волноводах, погруженных в жидкость. Как известно, при падении звуковой волны частоты тод углом к оси волновода с поперечным размером 2а в нем может возбуждаться только определенный спектр нормальных волн. которых выполняется для условие оптимального возбуждения $\gamma_0 = \arccos \frac{C_o}{C_{\phi}} = \arccos \frac{k_{\phi}}{k_0}.$ Это условие, как можно заметить, соответствует условию максимального излучения, что указывает на обратимость волноводных антенн, подтвержденную экспериментально.

Таким образом, наличие волноводного звена и в режиме приема также обеспечивает преобразователю направленность. Благодаря этому и лучшему согласованию преобразователя со средой существенно повышается чувствительность, увеличивается помехоустойчивость к изотропной помехе.

Кроме того, волноводные приемники обладают углочаизбирательностью, стотной так как направление их максимальной чувствительности однозначно связано с определенной спектральной составляющей шумового сигнала $\gamma_0 = \arcsin(c_0/c_{\omega}(\varpi, d))$. Именно это свойство волноводного звена обеспечивает пространственночастотную фильтрацию помех и повышает помехоустойчивость.

Благодаря углочастотной избирательности волноводные приемники слабо чувствительны к турбулентным помехам, возникающим при обтекании антенны в воде, которые, как известно, наиболее сильно развиты на боковой поверхности буксируемого тела. Несмотря на то что гидродинамические помехи и полезный сигнал принимаются в основном именно боковой поверхностью волновода, сигнал и помеха не коррелированы между собой, что объясняет потенциальные преимущества использования ВА в качестве буксируемых приемных антенн.

Расчет электроакустических характеристик волноводных антенн

Волноводная структура гидроакустической антенны бегущей волны помимо формирования требуемых ХН является устройством, обеспечивающим электроакустисогласование ческой системы возбуждения антенны со средой. Расчет основных электроакустических характеристик волноводной антенны, таких как излучаемая мощность, входное сопротивление, входной электрический импеданс, потребляемая электрическая мощность, электроакустический к.п.д., чувствительность, полоса рабочих частот, требует решения задачи о возбуждении волновода с обязательным учетом влияния основных и дополнительных конструктивных элементов антенны. В конечном итоге реальная гидроакустическая волноводная антенна может представлять собой довольно сложную электроакустическую колебательную систему. Наиболее эффективной технологичной системой и возбуждения волноводов, особенно цилиндрических, можно считать стержневой секционированный пьезоэлектрический преобразователь с малыми по сравнению с длиной поперечными размерами, нагружаемый на волноводную структуру с торца. Поэтому большинство реальных конструкций волноводных излучателей этого типа можно описать в рамках одномерной физической модели.



Рис. 9. Схема расчетной модели волноводного излучателя: 1 – однородная часть волновода, 2 – неоднородная часть волновода с элементами крепления, 3 – соединительная муфта с узлом герметизации, 4 – секционированный пьезоэлектрический преобразователь. 5 – тыльная накладка

На рис.9. представлена схема построения одного из типовых вариантов волноводного излучателя. Такая упрощенная расчетная модель может включать в себя довольно широкий набор основных и дополнительных конструктивных элементов, к которым помимо волновода относятся элементы крепления, герметизации, согласующие слои, накладки и другие специальные элементы [13,14].

Определим электроакустические параметры волноводного излучателя, возбуждаемого с торца стержневым пьезоэлектрическим пакетом из *т* штук пьезопластин, с тыльной и передней накладками, узлом крепления и волноводной структурой. В расчетной модели передняя и тыльная накладки могут состоять из нужного количества фрагментов. Привлекая результаты, приведенные учитывая параллельв [14]. ность включения электродов пьезопластин, получим электрическое входное сопротивление волноводного излучателя в виде [13]:

 $C_n = \varepsilon_{33}^T (1 - k_{33}^2) S_n m / l_1$ – элек-трическая емкость секционированного пьезостержня, $R = 1/(\omega C_n \cdot tg\delta)$ – сопротивление диэлектрических потерь, tgδ – тангенс угла диэлектрических потерь, $\tau = RC_n$, $n = d_{33}S_n / (S_{33}^E l_1 (1 + i \operatorname{tg} \delta)) - \kappa_{OM}$ плексный коэффициент электромеханической трансформации, S_{33}^{E} , d_{33} – упругая и пьезоэлектрическая константы, $Z_0 = \rho_n V_n S_n$, V_n – скорость звука в пьезокерамике при продольных, колебаниях, $\tilde{k} = k(1 - i/(2Q)), \ k = \omega/V_n$ – волновые числа в керамике с потерями и без потерь, Q – механическая добротность пьезокерамики, S_n – площадь преобразова-теля, l_1 – толщина одиночного элемента, k_{33}^2 – энергетический коэффициент электромеханической связи, $\varepsilon_{33}^{T} = 1/\beta_{33}^{T} - ди$ электрическая проницаемость. Полученные выражения совпадают с выражениями, приведенными в работе [14], но при иных значениях физических параметров, а именно: величины C_{33}^{D} , h_{33} , β_{33}^{S} заменяются

 $Z_{_{\partial \pi}} = Z_{_{RC}} \left| 1 - \frac{n^2 Z_{_{RC}}}{Z_{_S} + \frac{(Z_1 + Z_t)(Z_2 + Z_t)}{(Z_1 + 2Z_t + Z_2)}} \right|, \tag{10}$

где

$$\begin{split} Z_{S} = & \frac{\tilde{C}\tilde{k}S_{n}}{i\omega\sin\tilde{k}l} = \frac{-iZ_{0}(2Q+i)}{2Q\left(1+1/(4Q^{2})\right)\sin\left(kl\left(1-i/(2Q)\right)\right)},\\ Z_{RC} = & \frac{1+\omega\tau}{i\omega C_{n}} = \frac{1}{i\omega C_{n}} + R,\\ Z_{t} = & \frac{i\tilde{C}\tilde{k}S_{n}}{\omega}\operatorname{tg}\left(\frac{\tilde{k}l}{2}\right) = \iota \frac{Z_{0}(2Q+i)}{2Q\left(1+1/(4Q^{2})\right)}\operatorname{tg}\left(\frac{kl}{2}\left(1-i\frac{1}{2Q}\right)\right). \end{split}$$

соответственно следующими: $I/S_{33}^{D}, g_{33}/S_{33}^{D}, g_{33}/S_{33}^{D} + \beta_{33}^{T}$.

Входное сопротивление передней накладки можно записать в виде [23]:

$$Z_{1} = \rho_{1}C_{1}S_{1}\frac{Z_{\text{BX}}\cos k_{1}d_{1} + i\rho_{1}C_{1}S_{1}\sin k_{1}d_{1}}{\rho_{1}C_{1}S_{1}\cos k_{1}d_{1} + iZ_{\text{BX}}\sin k_{1}d_{1}}.$$
(11)

Для тыльной накладки, нагруженной второй стороной на воздух, входное сопротивление определяется в виде:

$$Z_2 = i\rho_2 C_2 S_2 \operatorname{tg} k_2 d_2. \quad (12)$$

R данных выражениях принято: ρ_1 , ρ_2 , C_1 , \bar{C}_2 – соответственно плотность и стержскорость материалов невая передней и тыльной накладок, $k_1 = \omega/C_1, \ k_2 = \omega/C_2$ — волновые числа в накладках; S_1 , S_2 – площадь их сечений; d_1 , *d*₂ – толщина передней и тыльной накладок, $Z_{\rm BX}$ – входное сопротивление волноводной структуры, характеризующее акустическую нагрузку преобразователя. Волноводные излучатели имеют нетрадиционную нагрузку, которая ранее не исследовалась. Определение входного сопротивления излучающей структуры является достаточно сложной проблемой и находится из решения соответствующей полевой задачи на излучение при граничных условиях импедансного типа. В случае реальных волноводов конечной длины ее решение сильно усложняется.

Выполненные численными методами (с использованием метода конечных элементов и теории нормальных волн) сравнительные исследования входного импеданса волноводной структуры конечной длины показали, что для тонких волноводов $a/\lambda < 1$, по крайней мере в области частот $0.95 < \kappa_i a < 1.5$, $Z_{\rm BX}$ можно определить в аналитическом виде:

$$Z_{\rm BX} = \rho C_{\varphi} S \frac{Z_{\rm H} \cos \kappa L + i \rho C_{\varphi} S \sin \kappa L}{\rho C_{\varphi} S \cos \kappa L + i Z_{\rm H} \sin \kappa L},$$
(13)

где *L*, *S* – длина и площадь сечения волновода, *С* ϕ – фазовая скорость нормальной рабочей волны.

Величину сопротивления нагрузки на торце волновода $Z_{\rm H}$ можно найти как сопротивление излучения одностороннего пульсирующего поршня без экрана. На низких частотах оно имеет вид:

$$Z_{_{\rm H}} = \rho_0 C_0 S \Big[(\kappa_0 a)^2 / 4 + i 2 \kappa_0 a / \pi \Big].$$
(14)

В волноводе конечной длины при отражении прямой волны от торца может иметь место ее трансформация в волны других типов, но, как показали исследования, их вклад, по крайней мере в интересующем нас диапазоне частот, невелик [10]. Поэтому волновое число $\kappa = \kappa_1 + i\kappa_2$ можно найти как корни дисперсионного уравнения (3).

Потери энергии за счет физического затухания в композитных материалах довольно существенны, но их можно учесть, вводя механическую добротность среды Q, тогда волновое число можно определить в виде:

$$\kappa = \kappa_1 \left(1 + i \frac{\kappa_2}{\kappa_1} - \frac{1}{2Q} \right). \quad (15)$$

На рис. 10 приведены примеры расчета входного сопротивления волноводной структуры из эбонита с размерами L/a=12 с учетом потерь Q = 30и без потерь. Как видно из представленных частотных характеристик, входной импеданс волновода имеет осциллирующий характер на низких частотах $\kappa_i a < 1$, что обусловлено слабым излучением через боковую поверхность волновода и отражением от торца. Легко



проверить, что возникновение резонансов и антирезонансов отмечается соответственно на частотах f, когда длина волновода равна $L = \lambda/2n = \frac{C_{\varphi}}{2f}n$, и $L = \frac{C_{\varphi}}{4f}(2n+1).$

Входной импеданс уже при $x \approx 1,25$ носит практически чисто активный характер и стремится к $\rho C_{a}S$, входному сопротивлению бесконечно длинного стержня. Это объясняется отсутствием отраженной от торца волны благодаря практически полному ее излучению с боковой поверхности. Из расчетов видно, что в диапазоне частот $x \ge 1$ конечный волновод $L \approx (1-1, 1\lambda)$ представляет собой практически активную нагрузку для преобразователя, т.е. хорошо согласован со средой и работает в режиме бегущих волн. Как показали расчеты параметров волноводного из-

лучателя, волновод с размерами, при которых на рабочей частоте входное сопротивление чисто активное, улучшает согласование преобразователя со средой, при этом излучаемая мощность достигает максимума, а частота резонанса f_n сохраняется неизменной. Кроме того, из рисунков видно, что активная составляющая входного сопротивления волновода при х > 0,75 превышает реактивную часть, которая изменяется в широких пределах с индуктивного типа на емкостной. Это свойство волноводных структур конечной длины можно использовать, с одной стороны, для согласования преобразователей с нагрузкой, с другой – для достижения тех или иных требований к полосе рабочих частот. В частности, если волновод будет иметь на частотах ниже f_n реактивное́ преобразователя сопротивление индуктивного

типа достаточной величины, то в соответствии с теоремой Форестера [15] резонансная частота волноводного излучателя станет ниже, чем f_{p} .

Таким образом, можно выбрать волновод такой длины, что он будет влиять на частотные характеристики преобразователя как корректирующая цепь типа фильтра низкой частоты с сопротивлением Z $R + i\omega L$, т.е. можно понизить f_{p} или расширить полосу рабочих частот в дорезонансную область. Анализ результатов расчетов входного сопротивления волновода позволяет оптимизировать его размеры и показывает, что волноводное звено можно использовать как для согласования преобразователя с нагрузкой, так и для коррекции его частотной характеристики путем выбора соответствующей геометрии.

Как известно, разработка эффективных широкополосных

направленных низкочастотных излучателей представляет значительный практический интерес. На рис. 11 представлены примеры расчета АЧХ двух- и трехдиапазонных волноводных излучателей с применением вышеизложенной методики. Формирование низкочастотного резонанса трехдиапазонного излучателя и расширение полосы пропускания низкочастотного резонанса двухдиапазонного излучателя обеспечены соответствующим подбором параметров волноводных структур.

Разработанная методика расчета позволяет учесть практически все основные и дополнительные элементы конструкции, влияющие на частотные характеристики волноводных антенн. Основными элементами, оказывающими существенное влияние на положение резонансов АЧХ и полосу пропускания, являются узел крепления пьезопакета и сое-

динительная муфта узла герметизации. Дополнительными элементами являются соединительные шпильки и армирующие стержни из материалов более высокой упругостью С и плотностью. Совокупность перечисленных элементов конструкции приводит к существенному изменению акустических параметров волновода в зоне крепления, т.е. к появлению продольной структурной неоднородности акустических параметров волновода и усложняет задачу расчета характеристик излучателя. Описание волновых процессов в кусочно-однородных излучающих структурах, в состав которых входят функциональные узлы типа резонансных структур со специфическими параметрами, требует решения сложных краевых задач. Сделав ряд допущений, рассмотрим возникшую краевую задачу на основе импедансной модели, использующей метод согласованных полей. Рассматриваемая неоднородная структура разбивается на цилиндрические области, на границах между которыми «сшиваются» импедансные граничные условия, что будет строгим лишь в случае симметричных волн, как в данном случае.

В диапазоне частот, применяемом в гидроакустике, как правило, безразмерный частотный параметр изменяется в пределах $0,8 \le x \le 2$. В этом диапазоне частот в волноводе в первом приближении реализуется одномодовый режим с нулевой продольной нормальной модой в качестве рабочей. Однако картина ее распространения вдоль неоднородного в осевом направлении волновода усложняется. В конце зоны крепления будут иметь место частичное отражение рабочей волны и искажения, связанные с ее трансформацией в продольные нормальные волны других



60 ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2010. № 2(10)

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

номеров. Как показали расчеты спектров продольных волн в волноводах из акустически податливых материалов, при $x \leq 2$ это явление описывается волнами с минус комплексносопряженными парами постоянных распространения [10]. Причем амплитуды комплексных мод в цилиндрах, погруженных в жидкость, спадают еще быстрее при удалении от места их генерации, так как мнимые части постоянных распространения несколько больше, чем в стержнях со свободной границей. Численные оценки показали, что комплексные моды образуют убывающие по величине встречные потоки мощности, локализованные у границ в зоне, протяженность которой меньше длины узла крепления для реальных конструкций волноводных излучателей, и поэтому в первом приближении оказывают малое влияние. Возможные явления резонансного накопления энергии комплексных мод, способные создавать большую амплитуду смещений, описанные в ряде работ, принадлежат частотам выше указанного рабочего диапазона [16]. Кроме того, можно ожидать, что если комплексные моды, порожденные нулевой рабочей модой, не представляют диссипацию, то вся их энергия возвращается в распространяющуюся моду. Справедливость отмеченного также подтверждают выполненные нами многочисленные экспериментальные исследования полей излучения волноводных излучателей.

Таким образом, можно считать, что волновые процессы, наблюдающиеся в продольнонеоднородном волноводе, в указанном рабочем диапазоне частот в основном определяются суперпозицией нулевой продольной прямой и отраженных от границ нормальных волн. Поэтому для определения входного сопротивления неоднородного волновода можно воспользоваться известным методом импедансов [15]. Из решения краевой задачи о колебаниях стержня конечной длины с поперечными размерами 2a, значительно меньшими длины волны $a/\lambda < 1$ и его длины в рабочем диапазоне частот, можно определить импеданс в любом сечении. Входной импеданс продольно-неоднородного волновода, состоящего из нескольких частей, можно получить методом «сшивания», если известны входные сопротивления участков, отличающихся акустическими параметрами. В частности, для волновода с узлом армирования

$$Z_{\text{BX1}} = \rho_1 C_{\phi 1} S_1 \frac{Z_{\text{BX2}} \cos \kappa_1 L_1 + i\rho_1 C_{\phi 1} S_1 \sin \kappa_1 L_1}{\rho_1 C_{\phi 1} S_1 \cos \kappa_1 L_1 + i Z_{\text{BX2}} \sin \kappa_1 L_1},$$
(15)

где $L_1, S_1, \rho_1, C_{\varphi^1}, \kappa_1$ – соответ-ственно длина, площадь поперечного сечения, плотность материала, фазовая скорость, волновое число нормальной распространяющейся волны, в крепежно-армирующей зоне волновода; Z_{вх2} – входной импеданс однородной неармированной части волновода, метод его расчета и исследование особенностей приводятся в работе [17]. Заметим, что волновое число к, является комплексным и в силу приведенных выше оценок может рассчитываться как корни уравнения (3) и зависит от акустических параметров неоднородного по сечению узла крепления. которые также требуется определить. В зоне крепления волновода возникает дискретная анизотропная структура, как правило, состоящая из двух однородных материалов, продольно ориентированная относительно направления распространения упругих волн. При анализе акустических характеристик подобных структур будем основываться на следующих подходах. Так как поперечные размеры армирующих стержней по сравнению с длинами продольных и поперечных волн в материалах малы, то эффективные акустические параметры таких анизотропных композитных материалов определим, основываясь на теории мелкослоистых сред [18].

Можно считать, что подобная дискретная композитная структура ведет себя как однородная, но анизотропная, упругие свойства которой существенно зависят от ориентации армирующих стержней по отношению к направлению распространения волны, а также от упругих характеристик и объемных концентраций компонентов [19].

В данном случае распространение происходит параллельно слоям и периодичность их расположения при условии тонкости не играет роли. Следуя результатам работы [18], можно получить выражения для определения эффективных параметров композита, создаваемого при армировании, как некоего однородного материала. Определив его эффективные плотность, скорости продольной и поперечной волн, можно рассчитать постоянные распространения к₁ как корни дисперсионного уравнения для нулевой продольной моды.

Причем если в конструкции излучателя армированная часть волновода свободна или боковой поверхностью нагружена на воду, то значения κ_1 определятся из решения соответствующей граничной задачи как корни уравнения Похгаммера [2] или дисперсионного уравнения для цилиндра, погруженного в жидкость. При этом значения κ_1 будут соответственно либо вещественными, либо комплексными. Заметим, что эффективные акустические характеристики узла крепления ρ_1 , $C_{\alpha 1}$, κ_1 для конструкций излучателя со свободной боковой поверхностью в диапазоне низких частот можно рассчитать проще, не прибегая к расчету корней уравнения Похгаммера. Зная объемное содержание однородных компонентов в созданном при армировании композите, их модули упругости и плотности, из простых известных выражений [20] легко найти эффективные модуль Юнга и плотность композита и определить κ_1 , C_{a1} .

Таким образом, на основании изложенного метода расчета входного сопротивления продольно-неоднородного волновода конечной длины можно по формуле (10) рассчитать входное электрическое сопротивление волноводной антенны и определить потребляемую электрическую мощность:

$$P_{\scriptscriptstyle \partial \pi} = \frac{U^2}{2} \operatorname{Re}(Y_{\scriptscriptstyle \partial \pi}) = \frac{U^2}{2} \operatorname{Re}\left(\frac{1}{Z_{\scriptscriptstyle \partial \pi}}\right),$$
(16)

где $Y_{_{\mathfrak{P}\!n}}$ – электрическая проводимость, U – электрическое напряжение, подводимое к преобразователю. Излучаемую акустическую мощность цилиндрического волноводного излучателя можно рассчитать по известным выражениям:

$$P_{a} = \frac{\dot{\xi}_{z}^{2} \cdot r_{\text{BX}}}{2}, \qquad (17)$$

где ξ_z – амплитуда осевой компоненты вектора колебательной скорости на входе волновода, $r_{\rm BX}$ – активная составляющая $Z_{\rm BX}$ и входного импеданса волноводной структуры.

Осевую компоненту колебательной скорости можно найти в виде: Для оценки энергетической эффективности работы излучателя определим электроакустический коэффициент полезного действия η_{ac} :

$$\eta_{aa} = \frac{P_{a}}{P_{a\pi}} = \frac{\dot{\xi}_{z}^{2} \cdot r_{\text{BX}}}{U^{2} \operatorname{Re}(Y_{a\pi})}.$$
 (19)

В соответствии с описанным алгоритмом решения задачи о возбуждении продольнонеоднородной волноводной структуры стержневым секционированным преобразователем была создана программа, позволяющая рассчитать ее входной импеданс и основные электроакустические характеристики волноводных излучателей.

Реализованная в программе расчетная модель волноводного излучателя включает в себя довольно широкий набор конструктивных элементов. В созданной модели передняя и тыльная накладки могут состоять из 5 фрагментов, что позволяет довольно точно моделировать накладки сложной геометрии. Стержневой пьезопакет содержит т пьезошайб и рассчитывается с учетом влияния механических и электрических потерь. Продольнонеоднородный волновод состоит из 2 частей: неоднородной, армированной элементами крепления, и однородной. На рис. 12 представлен один из примеров расчета частотной характеристики излучаемой мощности, выполненного по изложенной методике для расчетной модели, показанной на рис. 9, с учетом узла крепления (кривая 1) и без (кривая 2). Как видно из результатов расчета, наличие неоднородности приводит к расширению частотной характеристики в дорезонанс-

$$\dot{\xi_z} = \frac{nU(Z_t + Z_2)}{(Z_s - n^2 Z_{RC})(Z_1 + 2Z_t + Z_2) + (Z_1 + Z_t)(Z_2 + Z_t)}.$$
(18)

62 ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2010. № 2(10)

ную область. Этот результат получен в результате оптимизации параметров элементов конструкции волноводной антенны с целью обеспечения заданной амплитудно-частотной характеристики излучателя.

Измеренная частотная характеристика чувствительности экспериментального образца волноводного излучателя, изготовленного на основании расчетов, показана на рис. 13. Таким образом, волноводная структура в сочетании с элементами конструкции и пьезоэлектрической системой возбуждения обладает уникальной особенностью и возможностью в регулировании полосы пропускания волноводных антенн формировании и сложных амплитудно-частотных характеристик.

Практические результаты разработки гидроакустических волноводных антенн и перспективы их применения в подводных технических средствах

Исследование и разработка волноводных антенн ведутся авторами более 20 лет. За истекший период была глубоко разработана теория волноводных антенн, созданы методики их расчета, проведены обширные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по практической реализации антенн этого типа, разработана технология их изготовления. Разработан целый ряд конструкций волноводных антенн различного класса и назначения, которые постепенно внедряются и находят применение в гидроакустической аппаратуре различного назначения. Сначала немного истории. Первая информация возможности построения

1300

гидроакустических антенн на волноводных структурах пришла из-за рубежа [21]. В небольшой статье Д. Чарча было дано краткое описание нового типа направленного источника звука для гидролокационных станций дальнего обнаружения. В работе не было ни одной формулы, но зато было заявлено, что это «чудо» гидроакустической техники способно излучать акустическую мощность в 1мВт на частоте 500 Гц, имеет направленность в секторе 45° , длину несколько десятков метров и должно подвешиваться под днищем судна. И антенна эта состояла из группы волноводных излучателей бегущей волны. Волноводами являлись тонкие ребристые металлические стержни длиной порядка 70 м, которые возбуждались через концентраторы мощными преобразователями. Понятно, что ребристость волноводов понадобилась, чтобы понизить фазовую скорость и «прижать» излучение к оси, ну а такая длина – чтобы вся акустическая энергия успела излучиться. К тому времени мы уже кое-что понимали в волноводных антеннах и решили поискать материал для волноводов с заведомо низкой скоростью, и нашли эбонит. Запросы по частотам и мощности были гораздо скромнее, и к тому же появились заказчики - организации, занимающиеся морской геологоразведкой: ГНПП «Севморгео» и «Дальморгеология». Так в начале 90-х годов на свет появились первые отечественные гидроакустические волноводные антенны для систем сейсмопрофилирования. Была разработана конструкция волноводного излучателя на диапазон частот 2,5-3 кГц с возможностью излучения акустической мощности в пределах 1,5-2 кВт короткими импульсами. Были изготовлены



Внешний вид антенной системы сейсмопрофи-

первые несколько экземпля-

ров, конструкция которых по-

следовательно совершенство-

валась, и далее была создана

мощная антенная система из

трех излучателей для заборт-

ного профилографа. Подводимая к антенне электрическая мощность составляла 10 кВт и обеспечивала уровень звукового давления на оси 100 кПа. Внешний вид этого изделия

ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2010. № 2(10) 63

Наименование параметра	ИПГВ- 5-1Э/2000	ИПГВ- 3-1ЭБ	ИПГВ- 2,5-Э2М	ИПГВ- 1,5/3-1Э	ИПГА- 12-1Э17Б
Резонансная частота (средняя), кГц	5,5	3,2	2,5	1,2/1,6/3,2	12
Чувствительность в режиме изл., Па·м/В	75	120	130	30/60/100	450
Чувствительность в реж. приема, мкВ/Па	1900	4500	4700	3000/5000/7500	10000
Полоса пропускания АЧХ, кГц	2,2	1	0,8	0,4/1/1	5
Ширина ХН (-3дБ), градусы	40	30	40	60	12×12
Коэффициент концентрации	12-14	25	14-16	6/8/9	220
Излучаемая акуст. мощность, кВт	1,3	1,8	2	0,8/3/6	1,5
Модуль входного электрического сопротивления, Ом	70	65	80-90	200/120/65	25
Электроакустич. К.П.Д, %	75	70	77	40 /60/75	60
Габариты, мм	Ø110×600	Ø110×1600	Ø110×1690	Ø220×1800	600×800×450
Масса, кг	15	25	27	90	30

Таблица 1. Основные технические характеристики ряда волноводных излучателей

демонстрирует фото на рис. 14. Профилограф работал в районах с глубинами до 1000 м и прозвучивал грунт на глубину 100-150 м.

Дальнейшее развитие волноводных излучателей низкочастотного диапазона двигалось в направлении повышения их эффективности, надежности, совершенствования конструкций, снижения массогабаритных характеристик.

В результате был создан ряд мощных волноводных излучателей и антенн для систем профилирования, гидролокации и акустической томографии, подтвердивших свою высокую эффективность в результате опытной эксплуатации. Основные технические характеристики некоторых из них представлены в табл. 1. Представленные антенны являются обратимыми направленными излучателями с цилиндрическими волноводами осевого излучения. Волноводы изготовлены πο специальной технологии на мелкослоистых направляющих структурах на основе эбонита.

Поперечная слоистость волноводных структур снижает фазовую скорость в них и обеспечивает формирование узкой ХН, ориентированной вдоль оси структуры. Наименьшая ширина ХН, которой удалось достигнуть на волноводах осевого излучения, пока составляет 30°, и существенную роль в ее формировании играет низкоскоростная мода Стоунли-Шолте. Основу систем возбуждения рассматриваемых антенн составляют мощные стержневые пьезоэлектрические преобразователи, обеспечивающие излучение акустической мощности до 3 кВт. Конструктивно излучатели представляют собой автономные герметичные модули силовой конструкции, которые могут использоваться как в качестве олиночных приемно-излучающих элементов, так и объединяться в группы. Как видно из приведенных данных, волноводные антенны обладают довольно высокой чувствительностью в режимах излучения и приема, полосой пропускания, достаточной для применения широкополосных сигналов, постоянством ширины и формы ХН в рабочей полосе частот, высоким к.п.д., обусловленным хорошим согласованием системы возбуждения через волноводную структуру со средой. Волноводные излучатели рассматриваемого класса имеют конфигурацию протяженного цилиндра, и применение их в качестве антенн профилографов требует их вертикальной ориентации, что может вызывать определенные ограничения на скорость их забортной буксировки. Как показала опытная эксплуатация, на скоростях до 4 узлов не наблюдалось каких- либо нарушений устойчивости излученияв приема сигналов. Увеличение скорости буксировки приводит к повышению турбулентности, и в данном случае рекомендуется использовать обтекатель типа вертикального крыла. Специально для мобильного забортного профилографа была разработана антенна ИПГВ-5-1Э/2000. Относительная полоса пропускания антенны составила 40% и была реализована с использованием рассмотренной

выше технологии построения согласованного продольнонеоднородного волновода. Рабочий участок полученной АЧХ антенны представлен на рис. 13. Совершенствование и модернизация конструкций излучателей для частотного диапазона 2-3 кГц позволила разработать универсальный (базовый) излучатель ИПГВ-2,5-Э2М, изготовленный в малой серии, подтвердившей идентичность основных характеристик всех экземпляров.

Выполненная обширная программа всесторонних испытаний излучателя подтвердила его высокую энергетическую эффективность. При определении предельных возможностей в режиме излучения уровень звукового давления на оси ХН составил 80 кПа, измеренная излучаемая акустическая мощность – 2,5 кВт, а к.п.д. – 90%. При этом параметр энергоемкости (отношение излучающей акустической мощности к массе) антенны составил 92 Вт/кг – довольно высокий показатель. При проведении эксперимента удалось обеспечить хорошее согласование излучателя с усилителем мощности, так что его входное электрическое сопротивление оказалось чисто активным.

На рисунках 15, 16 представлены АЧХ чувствительности и ХН излучателя. На основе этих излучателей был разработан экспериментальный образец развертываемой антенны для горизонтальной гидролокации (рис. 17).

Отмеченные выше ограничения на скорость буксировки при вертикальной ориентации, связанные с увеличением лосопротивления, бового практически устраняются при буксировке горизонтальноориентированного волноводного излучателя в направлении его оси симметрии. В результате был разработан



Рис. 16. ХН излучателя



Рис. 17. Экспериментальный образец развертываемой антенны для горизонтальной гидролокации



Рис. 18. Экспериментальный образец буксируемого излучателя ИПГВ-3-1ЭБ (а) и его диаграмма направленности (б)

экспериментальный образец компактного буксируемого излучателя ИПГВ-3-1ЭБ (рис.18) с XH шириной 30°.

Излучатель снабжен головным обтекателем, хвостовым стабилизатором и устройством для присоединения буксировочного кабеля. В обтекатель встроен датчик глубины. Максимальные глубины буксировки, на которые рассчитан данный излучатель, составляют 600 м. Применение волноводных антенн в таком качестве открывает возможности построения на их основе быстро развертываемых мобильных гидроакустических средств томографии, гидролокации и дальней связи.

В настоящее время разрабатывается буксируемая приемноизлучающая антенная система из двух волноводных излучателей, скомпонованных по схеме «Янус», с возможностью освещения сектора пространства по курсу буксировщика. Малое лобовое сопротивление и модульность антенны позволяют вернуться к идее, изложенной Д. Чарчем [21], только в более разумном и практически реализуемом варианте. Но «подвесить» такую антенну нужно под днище АНПА, что не потребует каких-либо изменений его конструкции. Возможности использования АНПА в качестве автономных мобильных средств освещения подводной обстановки и ретрансляторов дальней подводной связи регулярно обсуждаются в зарубежных и отечественных публикациях.

Потребность в снижении рабочих частот привела к разработке трехдиапазонного волноводного излучателя с рабочими частотами 1,6 и 3,2 кГц возможностью излучения акустических мощностей соответственно 3 и 6 кВт. Выбор определенной длины волновода позволил сформировать дополнительный низкочастотный резонанс на частоте 1,2 кГц с чувствительностью 30 Па·м/В. Первый и второй низкочастотные резонансы сливаются, образуя полосу пропускания 1-2 кГц, второй частотный диапазон лежит в пределах 2,6-3,6 кГц. ХН излучателя шириной 60° частотно независима, но при этом тыльный максимум ХН на низких частотах повышен, что обусловлено большим уровнем отражения от торца волновода моды Стоунли-Шолте. Тыльные лепестки ХН, формируемые обратной волной, представляют определенную проблему для излучателей с укороченным цилиндрическим волноводом. Для борьбы с этим недостатком было предложено использовать специальные поверхностные поглощающие экраны, покрывающие прочный корпус антенны. Эффективность этого способа хорошо иллюстрируется сравнением ХН излучателя ИПГВ-2,5-Э2М (рис. 16), измеренной в неэкранированном корпусе, с ХН излучателя ИПГВ-3-1ЭБ (рис. 18) экранированном корпусе. в Уровень тыльного поля второй антенны не превышает уровня 0.15.

Возможности построения антенных решеток из волно-

водных приемно-излучаюших элементов демонстрирует антенна ИПГА-12-1Э17Б, разработанная для высокочастотного буксируемого профилографа. Антенна представляет собой двумерную разреженную антенную решетку, составленную из 17 широкополосных направленных волноводных излучателей ИПГВ-2Э/12, расположенных неэквидистантно относительно узлов эквидистантной сетки 5×5 элементов с междуэлементными расстояниями (0,9-1,1)λ (относительно частоты 12,5 кГц). Конструкизлучающего раскрыва шия антенны (рис. 19) позволяет изменять междуэлементные расстояния и изменять конфигурацию раскрыва и при необходимости разместить в нем дополнительно до 12-15 излучателей для расширения частотного диапазона или увеличения уровня излучения. Частотная характеристика антенной решетки показана на рис. 20.

Развитие автономных подводных технических средств исследования океана (гидрофизических буев, погружаемых платформ, донных станций и маяков, автоматических необитаемых подводных аппаратов) востребовало разработку гидроакустической аппаратуры навигации, связи и управления. Для комплектования антенной системы требуются высокоэффективные малогабаритные антенны со специхарактеристиками. альными Рабочий частотный диапазон связной аппаратуры занимает довольно широкую область частот, определяемую в основном требованиями обеспечения необходимой дальности связи, и составляет 5-50 кГц. Требования к ХН в вертикальной плоскости определяют потребность узконаправленных харакв



Рис. 20. Частотная характеристика антенной решетки ИПГВ-2Э/12

> типа, для мелководных районов – широконаправленные XH. Иногда, если позволяют технические возможности, может использоваться несколько типов одновременно. Для формирования XH в пределах 40-90° была разработана линейка

16

17

18 19

15

f, кГц

теристиках – 40-60°, средней ширины – 60-90°, и широконаправленных – 90-180° при соответствующей круговой симметрии. Для обеспечения вертикального канала связи с предельных и средних глубин подходят XH первого и второго

8 9 10 11 12 13 14

Наименование параметра	ИПГВ-50	ИПГВ-30	ИПГВ-15	ИПГВ-10	ИПГВ-6
Резонансная частота (средняя), кГц	50±0,5	30±1	15±0,5	10±1	6,5
Чувствительность в режиме изл., Па·м/В	15-20	25-30	45	55-60	75
Полоса пропускания в режиме изл., кГц	5±1	6±1	5	3-4	2
Чувствительность в режиме приема, мкВ/Па	1500	2500	1800-2000	1500	1900
Полоса пропускания в реж. приема, кГц	3-5	4-6	4-6	4-6	2
Ширина XH (-3дБ), градусы	60	45-50	40-45	60	60
Рабочая глубина, м	500	5000	5000	5000	2000
Габариты, мм	Ø18×95	Ø40×200	Ø60×300	Ø60×300	Ø90×500
Масса, кг	0,04	0,5	1	1,2	6

Таблица 2. Основные технические данные антенн серии ИПГВ на основе цилиндрических волноводов



Рис. 21. Внешний вид антенны ИПГВ-30 с различными приемно-излучающими модулями

антенн серии ИПГВ на основе цилиндрических волновоперекрывающая диападов, зон частот от 5 до 50 кГц. Все антенны имеют типовую конструкцию и представляют собой герметичный безэкранный модуль, обеспечивающий работу аппаратуры на глубинах до 5000 м. Основные технические данные по этому типу антенн приведены в табл. 2. Характерными особенностями ХН являются частотная независимость их ширины и формы в рабочей полосе частот, отсутствие или очень низкий уровень бокового поля. Все антенны являются обратимыми. В унифицированные прочные корпуса антенн каждого типа могут устанавливаться приемноизлучающие модули различных модификаций, обеспечивающие требуемые АЧХ и ХН антенны.

На рисунках 21-23 представлены внешний вид и характеристики антенны ИПГВ-30 с различными приемно-излучающими модулями.

На рис. 24 представлена специальная гидроакустическая антенна связи и управления ИПГА-30-4/1ЭУГ45, обеспечивающая излучение-прием сигналов в широкой полосе частот



Рис. 22. Диаграммы направленности гидроакустических антенн ИПГВ-30



Рис. 23. Амплитудно-частотные характеристики гидроакустических антенн ИПГВ-30



Рис. 24. Забортная опускаемая гидроакустическая антенна связи и управления ИПГА-30-4/1ЭУГ45

в диапазоне 23-33 кГц (рис. 25). Антенна имеет четыре специальных приемно-излучающих модуля ИПГВ-30-1ЭУГ45 и осуществляет разделение пространства на четыре квадранта в соответствии с рис. 24, а, что позволяет выделить заданный сектор излучения-приема, а также управлять ориентацией и шириной секторов в зависимости от коммутации элементов. Общая ширина сектора освещенности в вертикальной плоскости может достигать 160°, в горизонтальной – 360° (4×90).





Рис. 26. Волноводная антенна ИПГВ-6-1Э/2000



Рис. 27. Амплитудно-частотная характеристика волноводной антенны ИПГВ-6-1Э/2000



Рис. 28. Антенна ИПГА-50-2ЭВ/150/500 и ее диаграмма направленности

Особенностью применяемого волноводного модуля является то, что волновод повернут относительно оси возбуждающего его пьезоэлектрического преобразователя на угол 45°, чем обеспечивается несимметричность формы диаграммы направленности в плоскости ориентации волновода. При этом в вертикальной плоскости обеспечивается формирование равносигнальных зон излучения-приема в соответствующих секторах.

Для обеспечения связи на расстояния 10-15 км могут быть рекомендованы антенны типа ИПГВ-10 и ИПГВ-15, основные характеристики которых приведены в табл. 2. Формы их амплитудно-частотных характеристик и характеристик направленности являются типовыми и сходны с характеристиками антенны ИПГВ-30 (рис. 22), только в соответствующем частотном диапазоне. Для обеспечения дальней связи на дистанциях порядка 30 км может быть использована антенна ИПГВ-6-1Э/2000 (рис. 26), представляющая собой мощный направленный волноводный обратимый излучатель с полосой пропускания

30% относительно средней частоты 6,5 кГц (рис.27). Для систем связи, работающих в мелком море, разработана антенна ИПГА-50-2ЭВ/150/500 со специальной XH (рис. 28).

Волноводные антенны из представленной группы могут использоваться в подводных системах связи, управления, приема и передачи телеметрических данных, а их массогабаритные характеристики позволяют применять их на донных станциях, автономных необитаемых подводных аппаратах и другом подводном оборудовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уолтер К. Антенны бегущей волны / Под ред. А.Ф.Чаплина. М.: Энергия, 1970. 480 с.

2. Прокопчик С.Е. Об излучении звука цилиндрическим волноводом, находящимся в жидкости // Теория направленных и фокусирующих систем: тез. докл. IV Дальневост. акуст. конф. Владивосток, 1982. С. 58-60.

3. Maltzev Yu., Prokopchik S. Underwater sound waveguide running wave transducers for shallow water acoustics // SWAC-97. (China Ocean Press. Beging China). 1997. P.615-620.

4. Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. Т. І, ч.А. 588 с.

5. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. С. 184-185.

6. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1972. 348 с.

7. Ущиповский В.Г., Прокопчик С.Е. О незатухающей моде продольных нормальных волн в упругом волноводе, погруженном в жидкость // Сб. тр. 46-й Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. Владивосток: ТОВМИ, 2003. Т. 1. С. 221-223.

8. Прокопчик С.Е., Ущиповский В.Г., Мальцев Ю.В., Тагильцев А.А. О влиянии волны Стоунли-Шолте на характеристику направленности цилиндрической волноводной антенны осевого излучения // Сб.тр. XX сессии РАО. Т. 2. М.: ГЕОС, 2008. С. 71.

9. Ущиповский В.Г., Прокопчик С.Е. Анализ полей излучения цилиндрической волноводной антенны конечной длины // Сб. тр. XIII сессии РАО. М.: ГЕОС, 2003. Т. 2. С. 275-278.

10. Ущиповский В.Г., Прокопчик С.Е. Отражение нормальных волн от торца цилиндра, погруженного в жидкость // Сб. тр. XIII сессии РАО. Т. 1. М.: ГЕОС, 2003. С. 261-264.

11. Прокопчик С.Е. Анализ звукового поля волноводной антенны переменного сечения // Проблемы научных исследований в области изучения и освоения Мирового океана.: тез. докл. IV Всесоюз. конф. Владивосток, 1983. С.75-77.

12. Ущиповский В.Г., Прокопчик С.Е. Расчет звукового поля осесимметричной волноводной антенны переменного сечения конечной длины // Сб. тр. XIII сессии РАО. Т. 1. М.: ГЕОС, 2003. С. 265-268.

13. Прокопчик С.Е., Мальцев Ю.В., Ущиповский В.Г. Влияние волноводной излучающей структуры на частотную характеристику гидроакустического излучателя // Тез. докл. VI междунар. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Санкт-Петербург, 2002. С. 168-173.

14. Иванов В.И. Расчет электрического импеданса пьезопреобразователя с учетом внутренних потерь // Дефектоскопия. 1976. № 2. С. 139-141.

15. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир, 1971. 558 с.

16. Zemanek J. An experimental and theoretical investigation of elastic wave propagation in cylinder // J. Acoust. Soc. Am. 1972. V. 51, № 1. P. 265-283.

17. Прокопчик С.Е. Входное сопротивление излучающей структуры цилиндрического волноводного излучателя // Тез. Докл. VI междунар. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 2002. С. 173-177.

18. Рытов С.М. Акустические свойства мелкослоистых сред // Акуст. журн. 1956. Т. 11. Вып. 1. с.71-85.

19. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы. М.: Логос, 2006. 398 с.

20. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Мир материалов и технологий. М.:Техносфера, 2004. 406 с.

21. Church Dr. A. A new type directive sound-source for long range sonar // IRE Wescon Convention Record. 1959. Pt.6. P. 4-12

22. Касаткин Б.А. Расчет ультразвукового поля в стержне при осесимметричном возбуждении // Дефектоскопия. 1966. №4. С. 3-9.

23. Свиридов Ю.Б. О возбуждении нормальных волн в пластине, расположенной в жидкости, при помощи ультразвукового пучка // Акуст. журн. 1974. Вып. 5. С. 761-765.

