

УДК 621.396.677:534.232

ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ ИЗЛУЧАЮЩАЯ РУПОРНАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ ЖИДКОСТРУЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

О. В. СУХАРЬКОВ

Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова

Получено 15.02.2011

Работа посвящена разработке гидроакустической излучающей рупорной антенны на основе прямооточного жидкоструйного преобразователя. Экспериментально исследовано изменение амплитуды первой гармоники в водной среде для конического, экспоненциального и катеноидального рупоров. Проведен сравнительный анализ для рупоров разной формы.

Роботу присвячено розробці гідроакустичної випромінюючої рупорної антени на основі прямооточного рідинно-струминного перетворювача. Експериментально досліджено зміну амплітуди першої гармоніки у водному середовищі для конічного, експоненційного й катеноїдального рупорів. Проведено порівняльний аналіз для рупорів різної форми.

The paper deals with developing of a hydro-acoustic radiating horn antenna based on the direct-flow hydrodynamic transducer. The amplitudes of the first harmonic in water medium have been experimentally studied for conical, exponential and catenoidal horns. A comparative analysis for the horns of different shapes has been performed.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск решения проблемы совершенствования современных средств подводной связи и гидролокации ведется в направлении использования более низких частот, исследования дальнего распространения звука в глубоком море и применения методов волновой теории. При этом особое внимание уделяется разработке и исследованию гидроакустических излучающих антенн, обязательными элементами которых являются эффективные глубоководные преобразователи [1–4].

Известно, что преобразователи пьезоэлектрического и магнитострикционного типов обычно используются в диапазоне, соответствующем низкочастотному ультразвуку. Общий недостаток гидроакустических антенн на основе таких излучателей – дорогостоящее высоковольтное оборудование, включающее сложные силовые генераторы. Еще одно слабое место пьезоэлектрических преобразователей связан с тем, что при высоких уровнях подаваемой мощности керамика разрушается (растрескивается). К недостаткам магнитострикционных преобразователей следует отнести необходимость применения поляризации при излучении и значительный вес таких устройств. При понижении рабочих частот до 5 кГц КПД электроакустических преобразователей существенно уменьшается, а использование их на частотах менее 1 кГц становится нецелесообразным из-за непомерного возрастания габаритов и массы. Вме-

сте с тем следует отметить, что антенные решетки, набранные из электроакустических излучателей, благодаря узкой диаграмме направленности и малой, по сравнению с размером антенны, длине волны, обладают высокой разрешающей способностью [2, 3].

В параметрических гидроакустических антеннах в качестве излучающего элемента выступает сам объем нелинейной жидкой среды, в котором происходит взаимодействие первичных волн накачки. К преимуществам таких антенн следует отнести острую характеристику направленности с подавленными боковыми лепестками для вторичной волны, сверхразрешение и широкополосность (нижняя граница диапазона вторичных волн у таких антенн составляет порядка 100 Гц). Однако их КПД в морской воде относительно низкий – от 3 до 5 % [2, 5].

Гидроакустические антенны на основе электродинамических преобразователей можно использовать для работы в диапазоне слышимых частот. Излучение значительной мощности на низких частотах реализуется в них с помощью податливой подвески диафрагмы. При работе в жидкости КПД таких антенн составляет от 5 до 6 % [6]. Их основной недостаток – полная потеря работоспособности при увеличении глубины более 100 м вследствие повышения жесткости и возникновения усталостных явлений в диафрагмах.

Излучающие антенны, использующие в своей работе энергию реактивных струй и водяного мо-

лота с ее контролируемым преобразованием в модулированный жидкостный поток, позволяют генерировать тональный сигнал в диапазоне от 50 Гц до 5 кГц [3, 7]. К их недостаткам следует отнести сложность эксплуатации и потерю работоспособности при увеличении глубины более 100 м из-за усталостных явлений в мембранах, диафрагмах и сильфонах.

Жидкоструйные преобразователи с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием составляют отдельный класс источников звуковых волн [8, 9]. Неоспоримые их преимущества состоят в экономичности (дешевизне изготовления излучателей), простоте в эксплуатации, отсутствии источников высокого напряжения и вредных высокочастотных электромагнитных полей, малых габаритах и весе, отсутствии вибрирующих элементов конструкции, что обеспечивает длительный срок службы преобразователей. Они способны эффективно работать в широком диапазоне избыточных статических давлений (на глубинах от 10 до 240 м) и обладают достаточно высоким уровнем акустического сигнала. Так, интенсивность звука вблизи зоны звукообразования преобразователя с увеличением гидростатического давления от 1 до 25 атм возрастает от 2 до 98 Вт/см². Рабочий диапазон тонального сигнала жидкоструйных преобразователей находится в интервале от 300 Гц до 9 кГц [8, 10]. Следует, однако, отметить, что при создании гидроакустических рупорных антенн преобразователи такого типа ранее не использовались.

Цель данной статьи – исследование возможности создания гидроакустической излучающей рупорной антенны на основе прямого жидкоструйного преобразователя с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием [8].

1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРЕДРУПОРНОЙ КАМЕРЕ

В процессе проектирования рупорной антенны в качестве предрупорной камеры было решено использовать толстостенную стальную цилиндрическую трубу с фланцем. Ее стенки можно считать абсолютно жесткими, по сравнению с заполняющей водной средой. Известно, что трубу с абсолютно жесткими стенками можно рассматривать как длинную линию, поскольку вдоль нее может бежать одномерная волна любого профиля. В широких трубах могут распространяться также неоднородные волны, но если труба достаточно узкая, то всякое неоднородное возмущение быстро затухает по ее длине. Оговоримся, что термин узкая

труба имеет относительный смысл. Так, согласно Исаковичу [11], для звука с длиной волны λ круглая труба радиуса R будет “узкой” при $R < 0.61\lambda$, где λ – длина волны. Если же труба “очень” узкая, т.е. $R \ll 0.61\lambda$, то распространение волны в ней не зависит от формы оси (она прямая, изогнутая или даже имеет изломы) и во всех случаях давление и скорость частиц, оставаясь практически постоянными по всему сечению, зависят только от одной координаты – расстояния, отсчитываемого вдоль оси трубы. Тюлин [12] рассмотрел движение плоских волн в трубе, создаваемое действием источника (например, когда на одном конце трубы присутствует колеблющийся поршень). Им было установлено, что для получения плоской волны должно быть выполнено условие $S \ll \lambda^2$, где S – площадь поперечного сечения трубы.

Рассмотрим условие распространения плоских акустических волн в цилиндрических волноводах неизменного поперечного сечения. В этом случае волновое уравнение в обобщенных цилиндрических координатах имеет вид

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где Φ – потенциал колебательной скорости частиц заполняющей волновод жидкой среды; c – скорость звука; t – время; r – расстояние от оси цилиндра (называемой осью z); φ – азимутальный угол [13]. Для группы стоячих волн решение уравнения (1) выражается через функции Бесселя и Неймана m -го порядка:

$$R(r) = \dot{A} J_m(k_r r) + \dot{B} N_m(k_r r). \quad (2)$$

Решение (2) можно применить для рассмотрения распространения волн в круглых трубах, если постоянную k_r определить таким образом, чтобы удовлетворить граничным условиям. Для трубы с абсолютно жесткими стенками это условие записывается следующим образом:

$$\left. \frac{\partial}{\partial r} J_m(k_r r) \right|_{r=R} = k_r J'_m(k_r R) = 0 \quad (3)$$

или $k_r R = \gamma_{mn}$, где γ_{mn} – корни уравнения (3). В таблице представлены значения первых таких корней для $m, n = 0, 1, 2, 3$.

Следует отметить, что $\gamma_{10} < \gamma_{01}$ и, следовательно, запирающие нормальная волна, соответствующей $m=1$, происходит при более низкой частоте, чем для первой неосевой моды с $m=0, n=1$. Критическая частота для неосевой моды, распространяющейся в направлениях, наклонных к оси

Таблица. Значения первых корней производной функции Бесселя

m	$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
0	0	3.83	7.02	10.17
1	1.84	5.33	8.54	11.71
2	3.05	6.71	9.97	13.17
3	4.20	8.02	11.35	14.59

z , определяется выражением

$$f_{mn} = \frac{\gamma_{mn}c}{2\pi R}. \quad (4)$$

Таким образом, при частотах ниже частоты распространения моды с $k_r = \gamma_{10}/R$, т. е. ниже

$$f_{10} \approx \frac{0.293c}{R}, \quad (5)$$

в трубе в осевом направлении могут распространяться только плоские волны [13]. При этом для источника звука с длиной волны λ необходимо выбирать цилиндрический волновод, у которого радиус $R < 0.29\lambda$.

Поскольку предрупорная камера представляет собой затопленную в водной среде трубу конечных размеров с фланцем, то ее длину необходимо подбирать с учетом собственных резонансных частот. Это важно, так как для некоторых соотношений длины волны с длиной трубы входное удельное акустическое сопротивление имеет чисто реактивный характер и достигает максимума, что способствует возникновению антирезонансных частот. Собственные резонансные частоты для трубы с жесткой и мягкой заглушками на концах определим по формуле [14]:

$$f_n = \frac{(n - 1/2)c}{2l}. \quad (6)$$

Согласно выражению (6), длина предрупорной камеры может принимать следующие значения: $l = 0.25\lambda, 0.75\lambda, 1.25\lambda, 1.75\lambda, \dots$

Важно также определить местоположение источника звука в предрупорной камере относительно жесткого фланца водозаполненной трубы. При этом учтем, что удельное акустическое сопротивление стального фланца $(\rho c)_{ст} = 39 \cdot 10^3 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ значительно больше волнового сопротивления морской воды, которое составляет $(\rho c)_в = 1.55 \cdot 10^3 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$. Известно [12], что наибольшие звуковые давления p_z на оси трубы достигаются тогда, когда между отражающей поверхностью фланца и источником

звука располагается нечетное число четвертей волны, т. е. источник находится в минимуме давления. В этом случае наблюдается совпадение частоты возбуждающего источника с собственной частотой продольных колебаний среды, заполняющей пространство от источника до фланца трубы. Интенсивность звука при этом достигает максимальных величин вследствие резонанса. Максимумы звуковых давлений в данном случае превышают давление $p_0 = \text{const}$ на источнике, причем

$$|p_z|_{\max} = |p_0| \frac{(\rho c)_{ст}}{(\rho c)_в}. \quad (7)$$

Минимумы давлений равны звуковому давлению на источнике, т. е. $|p_z|_{\min} = |p_0|$. Следует отметить, что формула (7) получена без учета потерь, вызывающих затухание акустических волн в реальной жидкой среде.

2. ФОРМИРОВАНИЕ БЕГУЩИХ ОДНОМЕРНЫХ ВОЛН В РУПОРАХ

Цилиндрическая труба будет малоэффективным излучателем звука, если открытый ее конец имеет диаметр меньший, чем длина волны исходящего из нее звука. В воздушной среде для существенного увеличения активной составляющей акустической мощности в звукопередающих и вещательных системах широко используются рупоры различных форм [15, 16]. Назначение рупора заключается в том, чтобы распространить волны, возбуждаемые преобразователем и сконцентрированные на малой площади, на большую площадь. В результате этого они могут выходить беспрепятственно из устья (раскрыва), лишь в очень малой степени отражаясь назад к излучателю. Другое важное назначение рупора состоит в концентрировании звука в форме направленного пучка лучей таким образом, чтобы большая часть излучаемой энергии распространялась в заданном направлении.

Если рупор расширяется не слишком быстро, то можно считать, что волна при распространении расходится равномерно по всему его сечению. Это позволяет применить для анализа волнового движения в рупоре приближенные методы расчета, предложенные в работе [15]. Будем считать, что смещение, давление и остальные акустические величины – функции только расстояния z , отсчитываемого вдоль оси рупора и времени t . Конечно, форма внутренней поверхности рупора влияет на форму волны и, так как поперечное сечение переменное, то следует ожидать зависимости также

от координат, перпендикулярных оси z . Выясним условия, при которых звуковая волна ведет себя как плоская волна, а также определим критерий для оценки, когда эти условия выполняются.

В рупоре, так же как и в трубе, любое отражение волны при распространении ее вдоль рупора уменьшает количество энергии, выходящей наружу, и задерживает часть энергии внутри рупора, из-за чего возникают резонансы на одних частотах и плохая передача на других. Это приемлемо для музыкальных инструментов, где желателен сильный резонанс, но крайне нежелательно для рупоров гидроакустических антенн, где нужна однородная по частоте передача. Следовательно, одним из критериев положительной оценки рупора должна быть возможность получения в нем бегущей одномерной волны. Математически это сводится к тому, что решение волнового уравнения, найденное в системе криволинейных координат (μ, θ) , должным образом подобранной для данного рупора, оказывается почти одномерной функцией только координаты z [15]. В этом случае приближенное одномерное волновое уравнение имеет вид

$$\frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial z} \left(S \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}; \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (8)$$

где p – звуковое давление; v – величина колебательной скорости частиц; S – полная площадь координатной поверхности μ , находящейся внутри рупора, зависящая только от μ . Если рупор “хорош”, то S пропорционально площади того сечения рупора, которое касается поверхности μ . Направление скорости v перпендикулярно к поверхностям μ и параллельно координате θ . Если волны гармонические во времени, то между величинами v и p справедливо соотношение

$$v = \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial z}.$$

Положим $S(z) = \pi[y(z)]^2$, где y – эффективный радиус поперечного сечения рупора на расстоянии z от узкого конца. Подставив выражение $p = (B/y) \exp(i\varphi - i\omega t)$ в уравнение (8), получим:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{y} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 - i \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0.$$

Действительная и мнимая части этого соотношения должны равняться нулю по отдельности, так как y и φ – действительны. Равенство нулю мнимой части показывает, что $\partial \varphi / \partial z$ – постоянная величина, которую мы обозначим $\tau\omega/c$. Равенство

нулю действительной части означает, что эффективный радиус поперечного сечения рупора приближенно должен удовлетворять уравнению

$$\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} - \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 (1 - \tau^2) y = 0.$$

Его решение, в которое введены постоянные интегрирования, выражается в виде

$$\begin{aligned} y &= y_0 [\operatorname{ch}(\beta z) + T \operatorname{sh}(\beta z)], \\ S &= S_0 [\operatorname{ch}(\beta z) + T \operatorname{sh}(\beta z)]^2, \\ \tau^2 &= 1 - \left(\frac{\beta c}{\omega} \right)^2 = 1 - \left(\frac{\beta \lambda}{2\pi} \right)^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, соответствующее приближенное решение для распространяющейся в положительном направлении плоской волны будет

$$p \simeq \frac{B}{y} \exp[i\omega(\tau z/c - t)]. \quad (10)$$

Форма рупора, представленная уравнением (9), определяется соотношением между величинами T и β . Постоянная T – это “коэффициент формы”, задающий главные свойства рупора вблизи его горла [15]. Размер горла рупора при $z = z_0$ определяется постоянными $y_0 = R$, где R – радиус избранной нами цилиндрической предрупорной камеры, и площадью сечения горла $S_0 = \pi R^2$. Показатель расширения рупора на метр длины β показывает быстроту его расширения: чем больше β , тем выше кривизна образующей $y = y(z)$. Если $T = 1/\beta z_0$, а $1/\beta \rightarrow \infty$, получаем конический рупор с углом между осью и образующей конуса $\operatorname{arctg}(R/z_0)$. Когда $T = 1$, то $y = R \exp(\beta z)$, а рупор – экспоненциальный. Если же $T = 0$, то образующая рупора представляет собой цепную линию и мы имеем дело с катеноидальным рупором. На рис. 1 изображены продольные сечения наиболее часто используемых видов рупоров.

Для рупора конической формы аналитическая зависимость, описывающая уменьшение амплитуды p_1 первой гармоники вдоль оси, имеет вид

$$p_1 = \frac{p_{m1}}{z + z_0}, \quad (11)$$

где p_{m1} – амплитуда первой гармоники в горле рупора; z_0 – расстояние от горла до вершины конуса (рис. 1).

В экспоненциальном рупоре площадь сечения изменяется по закону $S_z = S_0 \exp(2\beta z)$. Для гармоники основного тона, распространяющейся вдоль его оси, звуковое давление p_1 в произвольной точке z на оси связана с амплитудным значением

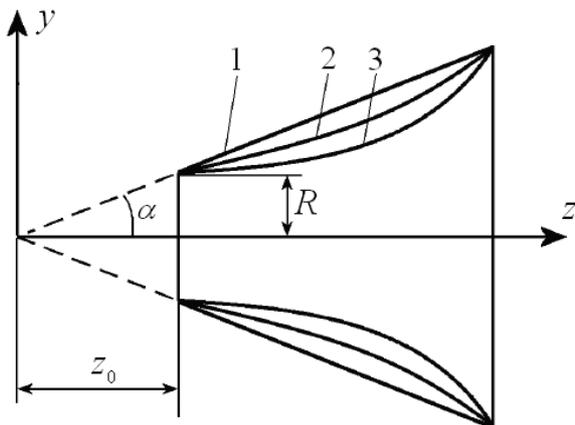


Рис. 1. Схема продольных сечений рупоров (z_0 и R – координаты сечения горла рупора, α – угол раствора):

1 – конический рупор; 2 – экспоненциальный рупор;
3 – катеноидальный рупор

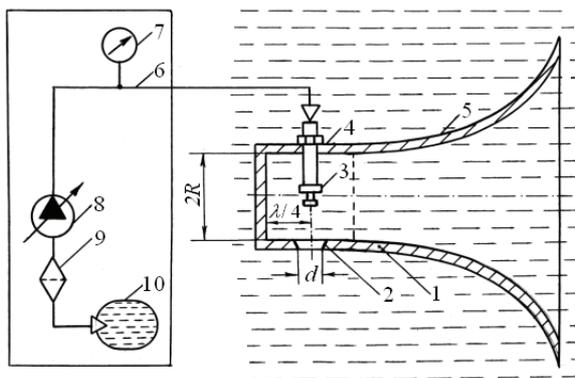


Рис. 2. Схема гидроакустической излучающей рупорной антенны

звукового давления в горле рупора p_{m1} уравнением

$$p_1 = p_{m1} \exp(-\beta z). \quad (12)$$

Следует отметить, что для экспоненциального рупора характерно наличие критической частоты $f_{кр} = \beta c / 2\pi$. Волна в нем распространяется от горла к устью рупора с уменьшающейся амплитудой и со скоростью c/τ , превышающей скорость звука в свободной среде. Поскольку, согласно формуле (9), скорость данной волны зависит от частоты, то экспоненциальный рупор обладает дисперсией. Ниже критической частоты в таком рупоре настоящего волнового движения нет и его нельзя применять ниже определенного минимума частоты $f_{кр}$, которая тем меньше, чем меньше β . Для того, чтобы эффективно излучать низкие частоты,

как и в случае конической формы, требуется очень длинный рупор.

В катеноидальном рупоре изменение площади сечения S_z происходит по закону $S_z = S_0 \text{ch}^2(\beta z)$. Амплитуда звукового давления $p_{1\text{кат}}$ первой гармоники вдоль оси рупора катеноидальной формы изменяется согласно зависимости

$$p_{1\text{кат}} = \frac{p_{m1}}{\text{ch}(\beta z)}. \quad (13)$$

Для рупора катеноидальной формы также имеется критическая частота $f_{кр} = \beta c / 2\pi$, ниже которой рупор плохо излучает звук. Заметим, однако, что выше критической частоты удельный акустический импеданс в горле рупора носит чисто активный характер.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ

Проведенный теоретический анализ позволил разработать гидроакустическую рупорную антенну, в которой в качестве генератора звука используется прямооточный жидкоструйный преобразователь с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием [8]. Ее схема представлена на рис. 2.

Гидроакустическая излучающая антенна 1 содержит жидкоструйный преобразователь 3, который установлен в вертикальной плоскости внутри предрупорной камеры 4 перпендикулярно ее верхней стенке. Предрупорная камера 4 представляет собой цилиндрический волновод (жесткостенную трубу) с фланцем и выполнена совместно с рупором 5. Преобразователь 3 установлен таким образом, что его зона звукообразования расположена на оси волновода на расстоянии от фланца камеры 4, равном четверти длины волны, соответствующей частоте основного тона f_0 генерируемого сигнала. Согласно выражению (5), радиус предрупорной камеры 4 выбирается из условия $R < 0.29\lambda_0$. На основании проведенных ранее экспериментальных исследований ближнего акустического поля жидкоструйного преобразователя [17], а также с учетом формулы (6), длину камеры 4 целесообразно выбирать в интервале $l = (0.265 \dots 0.275)\lambda_0$. В этом случае горло рупора будет расположено вне зоны нелинейного затухания звукового сигнала преобразователя, что позволяет сформировать в горле волну конечной амплитуды [18].

В нижней стенке предрупорной камеры 4 соосно с жидкоструйным преобразователем 3 выполнено круглое отверстие 2, диаметр которого d состав-

ляет (1.3...1.5) наружного диаметра преобразователя. Отверстие 2 необходимо для выхода турбулентного потока, исходящего от прямооточного жидкоструйного преобразователя 3 в процессе его работы, из предрупорной камеры 4. Выполнение данного конструктивного элемента способствует формированию внутри рупора 5 акустического поля в практически однородной, не имеющей турбулентных течений, водной среде. С учетом агрессивных свойств морской воды, все конструктивные элементы гидроакустической антенны должны изготавливаться из нержавеющей стали (например, X18H10T).

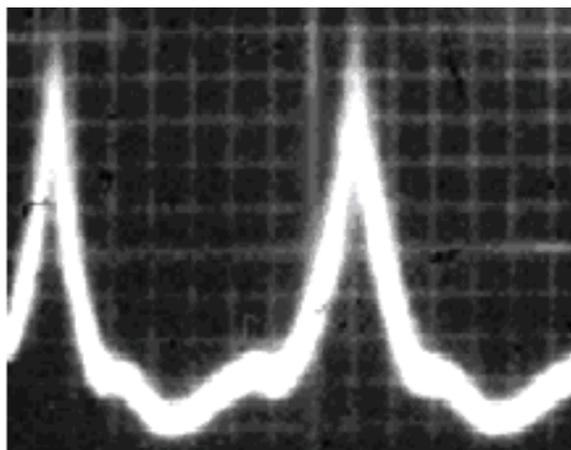
Работа антенны осуществляется следующим образом. При включении насоса 8 с плавно регулируемым расходом рабочей жидкости морская вода из специальной емкости 10 через фильтр 9 по трубопроводу 6 поступает в жидкоструйный преобразователь 3. В натуральных условиях для работы преобразователя 3 можно также использовать заборную морскую воду. При достижении оптимального режима работы преобразователя 3, который контролируется с помощью манометра 7, в предрупорной камере 4 генерируются сферически расходящиеся звуковые волны [17]. Уровень акустического сигнала зависит от режима истечения струи, геометрических параметров преобразователя и величины гидростатического давления на заданной глубине [8, 10].

Расположение преобразователя 3 на расстоянии, равном четверти длины волны основного тона акустического сигнала от фланца предрупорной камеры 4, позволяет сформировать в осевом направлении рупорной антенны плоскую волну. При этом на оси горла рупора 5 величина звукового давления, регистрируемого с помощью гидрофона, возрастает в несколько раз по сравнению со звуковым давлением в случае генерации преобразователем сигнала в свободной среде.

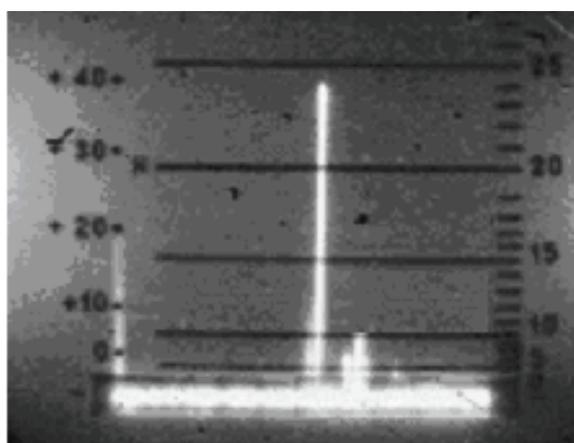
Для формирования характеристики направленности антенны в горизонтальной плоскости в разработанной антенне используется катеноидальный рупор. Его достоинствами являются плавное сопряжение рупора с предрупорной камерой и эффективное излучение сигнала в низкочастотной области звукового диапазона [15].

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование разработанной рупорной антенны проводилось в гидроакустическом бассейне с отстоянной водопроводной водой. Исходными данными служили скорость звука в водной сре-



а



б

Рис. 3. Характеристики волны конечной амплитуды, реализуемой в горле рупора:
а – фонограмма; б – спектрограмма

де $c=1500$ м/с, волновое сопротивление среды $(\rho c)_в=1.5 \cdot 10^3$ кг/(м²с), а также избыточное статическое давление $\Delta P_{ст}=5$ кПа. Для экспериментов использовался жидкоструйный преобразователь с основным типоразмером $a/D_c=0.5/13$, где a – ширина щели кольцевого сопла; D_c – средний диаметр сопла [8]. Частота основного тона генерируемого звукового сигнала $f_0=(870 \pm 3)$ Гц, что соответствует длине волны $\lambda_0 \approx 1.724$ м. Предрупорная цилиндрическая камера имела радиус, значительно меньший, чем длина волны: $R=0.035\lambda_0$. Испытания предрупорной камеры антенны показали, что благодаря продольному резонансу на частоте первой гармоники величина звукового давления в горле антенны возрастает примерно в три раза, по сравнению со случаем генерирования сигнала в свободной среде. На рис. 3 представлены

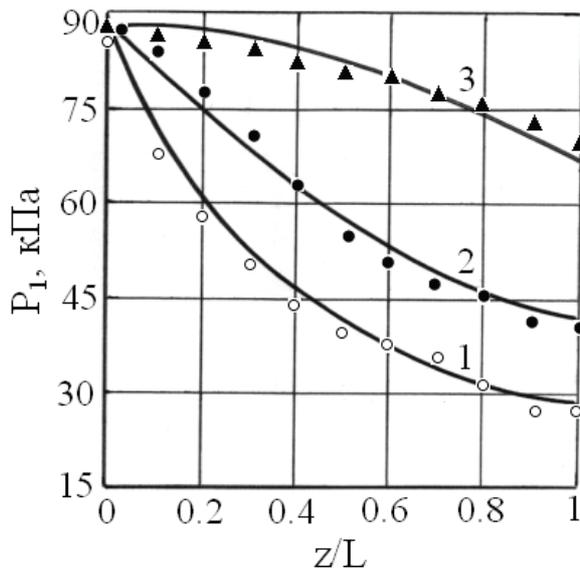


Рис. 4. График изменения амплитуд первых гармоник вдоль оси рупоров:

1 – конический рупор; 2 – экспоненциальный рупор;
3 – катеноидальный рупор

фонограмма и спектрограмма сформированной в горле рупора мощной волны конечной амплитуды для первой гармоники. Видно, что результирующий звуковой сигнал состоит из отдельных коротких импульсов экспоненциальной формы [17].

В экспериментах исследовалось изменение амплитуды звукового давления первой гармоники в водной среде для рупоров конической, экспоненциальной и катеноидальной форм. Для всех рупоров длина предрупорной камеры (см. рис. 1) составляла $l = z_0 = 0.47$ м. Показатель расширения для рупоров экспоненциальной и катеноидальной формы принимал значение $\beta = 0.75$ рад/с, соответствующий критической частоте $f_{кр} = 179$ Гц. Длина всех рупоров была $L = 1$ м. При этом начальная амплитуда звукового давления первой гармоники в горле рупора составляла $p_{m1} = 88$ кПа.

На рис. 4. сплошными линиями представлены теоретические зависимости изменения амплитуды первой гармоники вдоль оси рупоров, рассчитанные по формулам (11)–(13). Здесь же для каждого рупора маркерами изображены экспериментальные зависимости. Из графика видно, что именно закон возрастания сечения $S(z)$ рупора и служит фактором, определяющим закон убывания амплитуды генерируемого сигнала. Так, амплитуда звукового давления первой гармоники для катеноидального рупора при приближении к устью уменьшается примерно на 23 %. В то же вре-

мя, для рупора экспоненциальной формы амплитуда первой гармоники в раскрыве рупора вдвое меньше, чем амплитуда звукового давления в его горле. Что касается конического рупора, то амплитуда излучаемого антенной акустического сигнала уменьшается примерно в три раза, по отношению к уровню, регистрируемому в горле рупора.

Полученные результаты можно также объяснить в терминах различия коэффициентов отдачи рупоров. Коэффициент отдачи определяется как отношение мощности, излучаемой данным рупором, к мощности, излучаемой тем же преобразователем в цилиндрической трубе бесконечной длины и имеющей поперечное сечение, равное площади горла рупора. Коэффициент отдачи конического рупора при низких частотах мал и лежит между 0.05 и 0.25. С повышением частоты он приближается к единице и рупор становится более эффективным. Чем больше показатель расширения рупора β , тем ниже частота, начиная с которой конический рупор оказывается эффективным. Соответственно, излучаемая такой антенной мощность мала при низких частотах и монотонно возрастает с увеличением частоты, асимптотически приближаясь к величине $S_0 \rho c v_0^2 / 2$ [15]. Сравнение акустических характеристик рупоров (см. рис. 4) показывает, что экспоненциальный рупор лучше конического. Несмотря на то, что этот рупор практически ничего не излучает ниже критической частоты, для него коэффициент отдачи приближается к единице гораздо быстрее, чем для конического рупора [15]. В воздушной среде экспоненциальные рупоры наиболее широко применяются в звуковещании для излучения высоких частот.

Катеноидальный рупор на больших расстояниях от горла практически неотличим от экспоненциального, но в его горле быстрота изменения S в зависимости от z (dS/dz) равна нулю. Поэтому катеноидальный рупор может плавно переходить в трубу постоянного сечения S_0 , в то время как сопрягаются негладко, что приводит к эффекту отражения обратно в трубу в плоскости перехода. Выходная мощность рупора катеноидальной формы существенно больше, чем для экспоненциального рупора при том же β , и во много раз больше, чем для конического рупора тех же размеров. Подчеркнем, что повышение его эффективности связано именно с согласованием импеданса этого рупора с предрупорной трубой постоянного сечения [15].

Следует отметить, что при значительном увеличении акустической мощности в рупорах реализуется волна, известная в акустике как волна конечной амплитуды [18]. Она распространяется

вдоль рупора, причем на некотором расстоянии от его горла становятся значимыми нелинейные эффекты. Это приводит к тому, что часть энергии волны основного тона перекачивается в гармоники высших порядков (наибольшая ее доля приходится на вторую гармонику). Проведенные в воздушной среде экспериментальные исследования показали, что для катеноидального рупора нелинейные эффекты проявляются в меньшей степени, чем для экспоненциального и тем более конусного [16]. Таким образом, при проектировании гидроакустических антенн для эффективной передачи сигналов в низкочастотной области звукового диапазона гораздо выгоднее использовать рупоры катеноидальной формы.

Воспользуемся тем, что на больших расстояниях от горла катеноидальный рупор практически неотличим от экспоненциального. Тогда при проектировании гидроакустической антенны можно использовать результаты экспериментальных исследований рупоров экспоненциальной формы, представленные в монографии [19]. Согласно [19], для генерируемых частот $f \geq 2.3f_{кр}$ отражения от устья рупора оказываются малыми и его активное сопротивление превосходит 90 % соответствующего предельного значения. В этом случае диаметр устья рупора необходимо выбирать равным $\lambda_{кр}/\pi$, где $\lambda_{кр}$ – длина волны, соответствующая критической частоте $f_{кр}$ катеноидального рупора. Направленность рупорной антенны с таким диаметром раскрыва в довольно широких пределах – $(4 \dots 24)f_{кр}$ – остается практически постоянной и ее диаграмму можно представить в виде эллипса с эксцентриситетом $e = 0.9$.

ВЫВОДЫ

1. Проведен теоретический анализ формирования и распространения бегущих одномерных плоских волн в предрупорной цилиндрической камере и рупорах различных типов.
2. В водной среде при постоянном гидростатическом давлении экспериментально исследовано изменение амплитуды звукового давления первой гармоники для конического, экспоненциального и катеноидального рупоров.
3. Разработана гидроакустическая излучающая рупорная антенна, в которой в качестве генератора низкочастотных звуковых волн

используется прямооточный жидкоструйный преобразователь, нагруженный на катеноидальный рупор.

1. Митько В. Б., Евтютов А. П., Гуцин С. Е. Гидроакустические средства связи и наблюдения.– Л.: Судостроение, 1982.– 200 с.
2. Гидроакустика за 20 лет / сб. статей по мат. 80-го съезда Акуст. общ-ва США.– Л.: Судостроение, 1975.– 176 с.
3. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики.– Л.: Судостроение, 1978.– 448 с.
4. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика.– Л.: Судостроение, 1990.– 320 с.
5. Гринченко В. Т., Вовк І. В., Мацигура В. Т. Основы акустики.– К.: Наук. думка, 2007.– 640 с.
6. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой и др.– М.: Сов. энцикл, 1979.– 400 с.
7. Wallen A. E., Whitthead P. L. An acoustic projector pressure relief equalization system – APPRES // West. Electron. Eng.– 1972.– 16, № 3.– P. 17–21.
8. Сухарьков О. В. Оптимизация параметров прямооточного гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления // Акуст. вісн.– 2008.– 11, № 4.– С. 54–63.
9. Сухарьков О. В. Жидкоструйный излучатель со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков // Наук. праці ОНАЗ ім. О. С. Попова.– 2010.– № 1.– С. 102–108.
10. Сухарьков О. В. Влияние гидростатического давления на энергетические характеристики прямооточного гидродинамического излучателя // Наук. праці ОНАЗ ім. О. С. Попова.– 2009.– № 1.– С. 70–77.
11. Исакович М. А. Общая акустика.– М.: Наука, 1973.– 496 с.
12. Тюлин В. Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука.– М.: Наука, 1976.– 256 с.
13. Скучик Е. Основы акустики: том 2.– М.: Мир, 1976.– 542 с.
14. Справочник по технической акустике / под ред. М. Хекла и Х. М. Мюллера.– Л.: Судостроение, 1980.– 440 с.
15. Морз Ф. Колебания и звук.– М.: ИИЛ, 1948.– 660 с.
16. Сокол Г. И. Особенности распространения мощных звуковых сигналов в рупорах // Акуст. вісн.– 2003.– 6, № 1.– С. 67–73.
17. Сухарьков О. В. Экспериментальное исследование акустического поля прямооточного гидродинамического излучателя // Наук. праці ОНАЗ ім. О. С. Попова.– 2007.– № 1.– С. 39–44.
18. Наугольных К. А., Островский Л. А. Нелинейные волновые процессы в акустике.– М.: Наука, 1990.– 237 с.
19. Римский-Корсаков А. В. Электроакустика.– М.: Связь, 1973.– 272 с.