

**Н.П. Заграй****ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВОДНОЙ СРЕДЫ  
ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН**

*Рассматривается решение теоретической задачи и ее возможные прикладные значения при описании распределений плотности вторичных волн источников при нелинейном взаимодействии акустических волн в среде распространения, осуществляя тем самым диагностику экологического состояния водной среды. Это связано с уникальной особенностью влияния объема диагностируемой среды на результат и параметры нелинейного взаимодействия распространяющихся в этой среде акустических упругих волн. При этом возможны различные случаи ограничения области нелинейного взаимодействия. Рассмотрена различная пространственная геометрия зоны нелинейного взаимодействия при разных формах как излучающей поверхности, так и формы поверхности ограничения зоны эффективного нелинейного взаимодействия. Метод запаздывающего потенциала позволяет расширить круг рассматриваемых задач в области комбинационных ситуаций для различных реальных случаев нелинейного взаимодействия акустических волн, используемых при экологическом мониторинге. Полученные выражения в общем случае определяют поле давлений любой из комбинационных частот генерируемого спектра при незначительных процессах затухания и дифракции волн. Предлагается модель описания нелинейного взаимодействия акустических волн с учетом ограничения области нелинейного взаимодействия поверхностью произвольного вида, а также изменения величины скорости их распространения в пространстве канала. При этом возможна реализация различных законов зависимости как вида поверхностей ограничения, так и скорости звука от вертикальной поперечной координаты, при использовании соответствующих представлений полей волн на качки. Подобный метод позволяет вести оценку влияния неровностей поверхности дна контролируемых водных акваторий. Решение приводит к нахождению амплитудных угловых распределений вторичного поля АПА в дальней зоне при произвольном виде поверхности ограничения нелинейного взаимодействия и в общей виде любой конфигурации формы площади активного излучателя антенны. Эти распределения будут зависеть от физических свойств среды, в которой происходит нелинейное взаимодействие распространяющихся акустических волн. Тем самым эти параметры, определяемые в результате мониторинга, будут содержать информацию об их изменениях в экологическом состоянии диагностируемых областей среды.*

*Нелинейное взаимодействие распространяющихся акустических волн; экологическая диагностика; протяженность области нелинейного взаимодействия; физические свойства среды; виртуальные вторичные точечные источники; характеристики направленности.*

**N.P. Zagray****ECOLOGICAL MONITORING OF THE WATER ENVIRONMENT WITH  
ACOUSTIC INTERACTION OF ACOUSTIC WAVES**

*We consider the solution of the theoretical problem and its possible applied values in describing the distributions of the density of the secondary waves of sources in the nonlinear interaction of acoustic waves in the propagation medium, thereby realizing the diagnostics of the ecological state of the aquatic environment. This is due to the unique feature of the effect of the volume of the diagnosed medium on the result and the parameters of the nonlinear interaction of acoustic elastic waves propagating in this medium. In this case, various cases of limiting the region of nonlinear interaction are possible. Different spatial geometry of the nonlinear interaction zone is considered for different forms of both the radiating surface and the shape of the surface of the effective zone of the nonlinear interaction. The retarded potential method makes it possible to extend the range of problems under consideration in the field of combination situations for various*

*real cases of nonlinear interaction of acoustic waves used in environmental monitoring. The expressions obtained in the general case determine the pressure field of any of the combinational frequencies of the generated spectrum for small processes of wave attenuation and diffraction. A model is proposed for describing the nonlinear interaction of acoustic waves with allowance for the limitation of the region of nonlinear interaction by a surface of an arbitrary kind, as well as the change in the magnitude of their propagation velocity in the channel space. In this case, it is possible to implement various laws of dependence of both the type of the constraint surfaces and the speed of sound on the vertical transverse coordinate, using the appropriate representations of the pump wave fields. Such a method makes it possible to assess the influence of unevenness of the surface of the bottom of controlled water areas. The solution leads to finding the amplitude angular distributions of the secondary APA field in the far zone for an arbitrary form of the nonlinear interaction constraint surface and, in general, any configuration of the area shape of the active radiator of the antenna. These distributions will depend on the physical properties of the medium in which the nonlinear interaction of propagating acoustic waves occurs. Thus, these parameters, determined as a result of monitoring, will contain information about their changes in the ecological state of the diagnosed areas of the environment.*

*Nonlinear interaction of propagating acoustic waves; ecological diagnostics; extension of the nonlinear interaction region; physical properties of the medium; virtual secondary point sources, directional characteristics.*

**Введение.** Нелинейное взаимодействие распространяющихся акустических волн может быть использовано в решении экологических задач в качестве инструмента диагностики состояния водной среды. Ввиду виртуальности вторичного излучения основные характеристики акустической параметрической антенны (АПА) оказываются существенно зависящими от протяженности области нелинейного взаимодействия (ОНВ) [1–2], а в общем случае – от ее пространственной формы [3–4]. Форма ОНВ, т.е. объем среды, в котором происходит нелинейное взаимодействие акустических волн, может определяться не только видом поверхности активного излучателя [5–6], но и распределением в прилегающем к нему пространстве среды виртуальных вторичных точечных источников [7–8] соответствующих частот генерируемого спектра [8–9]. Теоретически задача сводится к нахождению амплитудных угловых распределений вторичного поля АПА в дальней зоне при произвольном виде поверхности ограничения ОНВ и в общей виде любой конфигурации формы площади активного излучателя антенны. Эти распределения будут зависеть от физических свойств среды, в которой происходит нелинейное взаимодействие распространяющихся акустических волн.

**Научная задача.** Работа АПА в реальных условиях показывает, что полностью или частично ограничивающая ОНВ поверхность может быть непараллельна поверхности излучающей антенны, и сама поверхность в общем случае - не только плоской. Для прямоугольного активного излучателя форма объема ОНВ в общем виде представлялась в форме параллелепипеда, для круглого - в виде цилиндра. При этом их торцевые поверхности, нормальные направлению распространению волны, рассматривались как плоскопараллельные [9–11]. В рамках модели [9–11] решение такой задачи позволяет рассчитать характеристику направленности (ХН) АПА в зависимости от протяжения ОНВ вдоль направления распространения волны только при условии нормального падения исходных волн первичного поля на торцевую поверхность ограничения ОНВ [12–14].

При наклонном падении исходных волн накачки форма ОНВ уже представляет параллелепипед, цилиндр и т.п. с непараллельными торцами, что приводит к изменению общей структуры поля АПА и прежде всего ее ХН. Степень такого изменения будет зависеть в общем случае от ее вида и угла наклона поверхности ограничения ОНВ по отношению к направлению излучения первичного поля.

Таким образом, возникает необходимость решения более общей задачи на случаи различных видов поверхностей ограничения и их положений в области нелинейного взаимодействия АПА (рис. 1).

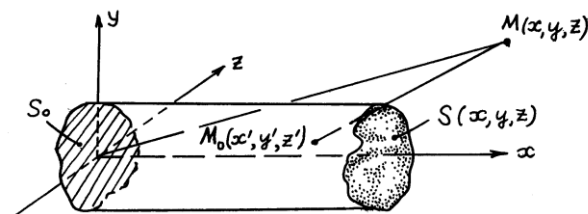


Рис. 1. Пространственная геометрия рассматриваемой задачи, где  $M(x, y, z)$  – точка наблюдения в дальней зоне,  $M_0(x', y', z')$  – точка расположения вторичных источников генерируемых волн,  $S_0$  – поверхность поршневого излучателя,  $S(x', y', z')$  – поверхность, ограничивающая область нелинейного взаимодействия объема  $V$

При излучении двух плоских волн накачки решением неоднородного волнового уравнения может быть получено выражение в виде запаздывающего потенциала [9]:

$$P(x, y, z, t) = \iiint_V \frac{1}{r} q \left[ x', y', z', \left( t - \frac{r}{C_0} \right) \right] dx' dy' dz', \quad (1)$$

где  $r$  – расстояние между точками расположения источников и точкой наблюдения (рис. 1),  $x', y', z'$  – координаты источников.

Для точки наблюдения  $M(x, y, z)$  в дальней зоне принимаются следующие допущения:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_0}, \quad r = r_0 - x' \cos \Theta - y' \sin \Theta,$$

$$q \left[ x', y', z', \left( t - \frac{r}{C_0} \right) \right] = q \left[ x', y', z', \left( t - \frac{r_0 - x' \cos \Theta - y' \sin \Theta}{C_0} \right) \right], \quad (2)$$

где  $r_0$  – расстояние от начала координат, расположенного в области нелинейного взаимодействия до точки наблюдения,  $\Theta$  – угол между направлением на точку наблюдения и положительным направлением оси  $x$ .

Определение функции вторичных источников  $q \left[ x', y', z', \left( t - r/C_0 \right) \right]$  для основных составляющих компонент спектра частот, генерируемых при нелинейном взаимодействии, позволяет на основе представлений (1) и (2) получить общее выражение давлений  $P(x, y, z, t)$  соответствующих полей во втором приближении посредством интегрирования по объему  $V$  существования вторичных источников:

$$P(x, y, z, t)_{[(\omega_1 - \omega_2), (\omega_1 + \omega_2), 2\omega_1, 2\omega_2]} =$$

$$= \frac{D}{r_0} \iiint_V A_{[(\omega_1 - \omega_2), (\omega_1 + \omega_2), 2\omega_1, 2\omega_2]} \cos(\alpha + \beta x' + \gamma y') dx' dy' dz', \quad (3)$$

где  $D = -\frac{2+B/A}{8\pi\rho_0 C_0^4}$ ,  $A_{(\omega_1 - \omega_2)} = (\omega_1 - \omega_2)^2 P_1 P_2$ ,  $\alpha_{(\omega_1 - \omega_2)} = (\omega_1 - \omega_2) \left( t - \frac{r_0}{C_0} \right)$ ,

$$\begin{aligned}
A_{(\omega_1+\omega_2)} &= (\omega_1 + \omega_2)^2 P_1 P_2, \quad \alpha_{(\omega_1+\omega_2)} = (\omega_1 + \omega_2) \left( t - \frac{r_0}{C_0} \right), \\
A_{2\omega_1} &= 2\omega_1^2 P_1^2, \quad \alpha_{2\omega_1} = 2\omega_1 \left( t - \frac{r_0}{C_0} \right), \\
A_{2\omega_2} &= 2\omega_2^2 P_2^2, \quad \alpha_{2\omega_2} = 2\omega_2 \left( t - \frac{r_0}{C_0} \right), \\
\beta_i &= \frac{2\pi}{\lambda_i} (\cos \Theta - 1), \quad \gamma_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} \sin \Theta.
\end{aligned} \tag{4}$$

Таким образом, существенной частью полученного выражения (3) при пространственном ограничении ОНВ является та, которая содержит пространственные координаты  $(x, y, z)$ . Поэтому дальнейшее рассмотрение необходимо проводить путем интегрирования по объему функциональной зависимости сомножителя вида  $\cos(a+bx+vy)$  в соответствующих плоскостях координат и исходных условиях.

Представленное выражение (3) с учетом обозначений (4) в общем случае определяет поле давлений любой из комбинационных частот генерируемого спектра при ограничении ОНВ поверхностью произвольного вида при незначительных процессах затухания и дифракции волн.

Для круглого излучающего поршневого преобразователя акустической параметрической антенны (АПА) с ограниченной областью нелинейного взаимодействия (ОНВ) произвольной поверхности  $f(r)$  пространственное определение области нелинейного взаимодействия в этом случае становится следующим:

$$0 < x < f(x, y) = f(r); \quad 0 < y < a; \quad 0 < z < (a - y). \tag{5}$$

Выражение для давления, например, в волне разностной частоты согласно (3), (4) и с учетом (5) представляется как:

$$P(x, y, z, t) = \frac{D}{r} \left\{ \cos \left[ (\omega_1 \pm \omega_2) \left( t - \frac{r}{C_0} \right) \right] \int_0^{f(r)} dx \int_0^a dy \int_0^{\sqrt{a^2 - y^2}} \cos(y'\gamma) \cos(\beta x') dz \right\}.$$

Переходя к цилиндрическим координатам и координатным поверхностям, соответствующим геометрии данной задачи, после интегрирования получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned}
P(x, y, z, t) &= \\
&= \frac{D}{r} \left\{ \cos \alpha \left[ \frac{\pi a}{2\gamma\beta} (\sin \beta f(r)) J_1(ar) - (\cos \beta f(r) - 1) H_2(ar) \right] - \right. \\
&\quad \left. - \sin \alpha \left[ \frac{\pi a}{2\gamma\beta} (\sin \beta f(r)) H_1(ar) - (\cos \beta f(r) - 1) J_1(ar) \right] \right\} =, \tag{6} \\
&= \frac{D}{r} \frac{\pi a}{2\gamma\beta} \sqrt{[1 - 2\cos(\beta f(r))] [J_1^2(ar) + H_2^2(ar)]} \times \\
&\quad \times \sin \left\{ \alpha + \arctg \frac{\sin [\beta f(r)] J_1(ar) - [\cos(\beta f(r) - 1)] H_1(ar)}{-[\cos(\beta f(r) - 1)] J_1(ar) - \sin [\beta f(r)] H_1(ar)} \right\}
\end{aligned}$$

где  $J_1(ar), H_1(ar)$  – цилиндрические функции Бесселя и Ханкеля первого рода соответственно.

Для выделения амплитудной и фазовой частей полученного выражения давления во вторичном поле использован переход вида  $(a \cos x + b \sin x) = r \cos(x - \varphi)$ , где  $r = \sqrt{a^2 + b^2}$ ,  $\varphi = \arctg(b/a)$ .

Для акустической параметрической антенны (АПА) с круглым излучателем первичного поля волн накачек при ограничении их области нелинейного взаимодействия (ОНВ) в частном случае плоской нормальной поверхностью, что соответствует следующему виду функции ограничения  $f(x,y)=f(r)=L$ , получаем выражения, аналогичные известным для прямоугольного излучателя при работе АПА в среде с акустическим фильтром по первичному полю накачки [14].

Учитывая возможность представления функции  $f(x,y)$  как зависимости от цилиндрической координаты  $r$  (радиуса в плоскости  $z=0$ ) оказывается возможным выделить целое семейство основных поверхностей ограничения для круглого поршневого излучателя как активной части АПА при использовании в экологических мониторингах.

Основные возможные виды поверхностей ограничения для цилиндрической формы области нелинейного взаимодействия могут быть представлены каждой из них может иметь практическое приложение в своем конкретном случае и на основе предлагаемого подхода может быть рассмотрена динамика изменения пространственной структуры вторичных полей АПА для каждого из них.

Для прямоугольного поршневого преобразователя акустической параметрической антенны (АПА) ограничение области нелинейного взаимодействия (ОНВ) произвольной поверхностью  $f(y)$  может быть представлена как:

$$-b/2 < z < b/2; \quad < y < a; \quad < x < f(y'). \quad (7)$$

Отсюда круг задач о различном виде функции ограничения ОНВ можно рассматривать, не конкретизируя аналитический вид  $f(y')$ , считая ее самого общего вида:

$$\begin{aligned} P(x, y, z, t) &= \frac{D}{r_0} A_f \int_{-b/2}^{+b/2} \int_0^a \int_0^{f(y')} \cos(\alpha + \beta x' + \gamma y') dx' dy' dz' = \\ &= \frac{DA_f b}{r_0} \left[ \begin{aligned} &\cos \alpha \int_0^a dy' \int_0^{f(y')} \cos \gamma y' \cos \beta x' dx' - \cos \alpha \int_0^a dy' \int_0^{f(y')} \sin \gamma y' \sin \beta x' dx' - \\ &-\sin \alpha \int_0^a dy' \int_0^{f(y')} \sin \gamma y' \cos \beta x' dx' - \sin \alpha \int_0^a dy' \int_0^{f(y')} \cos \gamma y' \sin \beta x' dx' \end{aligned} \right] = \\ &= \frac{DA_f b}{r_0} \frac{\cos \alpha}{\beta} \int_0^a \sin[\beta f(y') + \gamma y'] dy' + \frac{\sin \alpha}{\beta} \int_0^a \cos[\beta f(y') + \gamma y'] dy' + \\ &+ \frac{\cos \alpha (\cos \gamma a - 1)}{\beta \gamma} - \frac{\sin \alpha \sin \gamma a}{\beta \gamma} = \\ &= \frac{DA_f b}{r_0} \left\{ \frac{1}{\beta \gamma} [\cos(\alpha + \gamma a) - \cos \alpha] + \frac{1}{\beta} \int_0^a \sin[\alpha + \beta f(y') + \gamma y'] dy' \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

Выражение (8) является основным для последующих рассмотрений, которые возможны при задании конкретной аналитической формы функции  $f(y')$  под интегралом.

Полученная форма (8) является пригодной для рассмотрения других составляющих генерируемого спектра акустической параметрической антенны: обеих гармоник  $2f_1$ ,  $2f_2$  и волны суммарной частоты  $(f_1+f_2)$ . При этом только необходимо учесть соответствующие исходной общей форме (3) изменения в конечных выражениях вида (8).

На основании полученного общего выражения (8) становится возможным рассматривать некоторые наиболее часто встречающиеся случаи, имеющие важное значение для практического использования АПА.

Одним из интересных случаев возможных в рассмотрении дальнейшего приложения вышеизложенного является ситуация с неровным, неплоским дном, которая соответствует ситуации, при которой сплошная поверхность активных излучателей АПА по своим дискретным элементам имеют различную протяженность ОНВ. Это задача о параметрической антенне как системы прямоугольных излучателей с различными протяженностями областей нелинейного взаимодействия. Физически данная ситуация соответствует случаю, графически представленному на рис. 2.

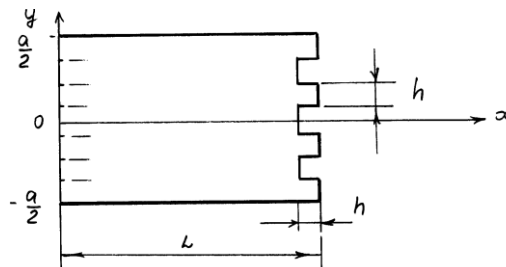


Рис. 2. Представление акустической параметрической антенны с различными протяженностями ОНВ ее дискретных активных излучателей

Границы объема ОНВ по двум изменяющимся координатам представляются при этом как:

$$\frac{a}{2} - (n-1)h \leq y \leq \frac{a}{2} - nh, \tag{9}$$

$$0 \leq x \leq L + (-1)^{n-1}h$$

где изменения протяженности ОНВ и линейные размеры активных излучателей характеризуются величиной  $h$  и принимаются в данном случае равными. Последнее, естественно, несколько упрощает получение конечных выражений давлений вторичных полей АПА и может не выполняться при самом общем рассмотрении данным методом.

Таким образом для данного случая выражение для давлений в вторичных полях АПА имеет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{P}(x, y, z, t) = & \frac{2Db}{r} \left\{ \frac{1}{\beta} \sum_{n=1}^k \int_{a/2-(n-1)h}^{a/2-nh} \sin[\alpha + \gamma y' + \beta(L + (-1)^{n-1}h)] \gamma y' - \frac{2}{\beta\gamma} \sin\left(\alpha + \frac{\gamma a}{2}\right) \sin\left(\frac{\gamma a}{2}\right) \right\} - \\ & - \frac{2Db}{r} \left\{ \frac{1}{\beta\gamma} \sum_{n=1}^k \int_{a/2-(n-1)h}^{a/2-nh} -\cos[\alpha + \gamma y' + \beta(L + (-1)^{n-1}h)] \gamma y' - \frac{2}{\beta\gamma} \sin\left(\alpha + \frac{\gamma a}{2}\right) \sin\left(\frac{\gamma a}{2}\right) \right\} = \\ = & \frac{4Db}{r} \frac{1}{\beta\gamma} \sum_{n=1}^k \sin\left\{ \alpha + \beta[L + (-1)^{n-1}h] + \frac{\gamma}{2}[a - h(2n-1)] \right\} \cdot \sin\left(\frac{\gamma h}{2}\right) - \frac{8Db}{r} \frac{1}{\beta\gamma} \sin\left(\alpha + \frac{\gamma a}{2}\right) \sin\left(\frac{\gamma a}{2}\right) + \\ & + \frac{4Db}{r} \frac{1}{\beta\gamma} \sum_{n=1}^k \cos\left\{ \alpha + \beta[L + (-1)^{n-1}h] + \frac{\gamma}{2}[a - h(2n-1)] \right\} \cdot \sin\left(\frac{\gamma h}{2}\right) \end{aligned} \tag{10}$$

После преобразований, выделяя амплитудную и фазовые части выражения (10), получаем:

$$\begin{aligned} \tilde{P}(x, y, z, t) = & \\ = & \frac{8Db}{r} \cdot \frac{1}{\beta\gamma} \sin\left(\frac{\gamma h}{2}\right) \sin \alpha \sum_{n=1}^k \sin \left\{ \frac{\beta}{2} \left[ L + (-1)^{n-1} h + \frac{\gamma}{2} (a - h(2n-1)) \right] \right\} \cdot \sin \left\{ \frac{\beta}{2} [L + (-1)^{n-1} h] \right\} - , \quad (11) \\ - & \frac{8Db}{r} \cdot \frac{1}{\beta\gamma} \sin\left(\frac{\gamma h}{2}\right) \cos \alpha \sum_{n=1}^k \cos \left\{ \frac{\beta}{2} \left[ L + (-1)^{n-1} h + \frac{\gamma}{2} (a - h(2n-1)) \right] \right\} \cdot \sin \left\{ \frac{\beta}{2} [L + (-1)^{n-1} h] \right\} = \\ = & \tilde{A} \cos(\alpha - \tilde{\varphi}) \end{aligned}$$

где  $\tilde{A} = \sum_{n=1}^k \frac{8Db}{r} \cdot \frac{1}{\beta\gamma} \sin\left(\frac{\gamma h}{2}\right) \sin \left\{ \frac{\beta}{2} [L + (-1)^{n-1} h] \right\}$ ,

$$\tilde{\varphi} = \arctg \left\{ \frac{\beta}{2} [L + (-1)^{n-1} h] + \frac{\gamma}{2} [a - h(2n-1)] \right\}.$$

В результате мы имеем выражения для давлений во вторичных полях АПА, которые могут быть использованы для рассмотрения структуры и направленности поля акустической параметрической антенна как в случае различных протяженностей ОНВ ее дискретных активных излучателей, так и ограничения ОНВ АПА дискретно-гофрированной границей раздела двух сред, при котором нелинейное взаимодействие исходных волн накачки происходит в первой среде до поверхности границы такой формы.

В большинстве случаев при исследованиях глубокой водной среды акустическими параметрическими приборами, скорость звука не является величиной постоянной [6]. Она зависит от многих факторов и может иметь различный характер изменения в зависимости от глубины [2]. В связи с этим представляет интерес описание направленности поля акустической параметрической антенны (АПА) в случае изменения скорости звука (СЗ) в среде нелинейного взаимодействия по некоторому закону (рис. 1). Максимальные изменения поля АПА будут происходить при работе ее на горизонте скачка вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ).

Предлагается модель рассмотрения теоретического описания нелинейного взаимодействия акустических волн с учетом изменения величины скорости их распространения в пространстве канала. При этом возможна реализация различных законов зависимости скорости звука от вертикальной поперечной координаты, использующихся в соответствующих представлениях полей волн накачки [15–17].

Будем считать, что ВРСЗ изменяется по закону:

$$C(y') = C_0(1 + \alpha y')^{-1/2} = C_0 \left( 1 + \frac{\alpha}{2} y' \right)^{-1} = C_0(1 + \varepsilon y')^{-1}, \quad (12)$$

где  $y'$  – координата, ортогональная направлению распространения волн накачки,  $C_0$  – скорость звука у поверхности,  $\varepsilon$  – постоянный коэффициент  $\varepsilon = \alpha/2$ , причем выполняется условие  $\varepsilon y' \ll 1$ .

Данное выражение скорости звука  $C(y)$  показывает, что в среде распространения (воде) имеет место слабая отрицательная рефракция, т.е. скорость звука с увеличением координаты  $y$  уменьшается, что соответствует уменьшению скорости звука с ростом глубины в море, когда траектория звукового луча искривляется (отклоняется) в сторону дна [3].

Выражение (12) для СЗ в среде распространения и нелинейного взаимодействия акустических волн поля накачки используется для формирования аргументов пространственно-временных зависимостей для исходных плоских волн:

$$\tau = \omega_1 t - k'_1 x' = \omega_2 t - k'_2 x'; \beta = \omega_1 t - k'_1 x' = \omega_2 t - k'_2 x',$$

где полагая закон изменения  $C(y')$  одинаковым для каждой из волн накачки, т.е.

$$C_{\omega_1}(y') = C_{\omega_2}(y')$$

выражения для волновых чисел  $k'_1(y')$  и  $k'_2(y')$  равны:

$$k'_1(y') = \frac{\omega_1}{C_{\omega_1}(y')} = \frac{\omega_1(1 + \epsilon y')}{C_0}; k'_2(y') = \frac{\omega_2}{C_{\omega_2}(y')} = \frac{\omega_2(1 + \epsilon y')}{C_0}.$$

Если законы изменения ВРСЗ для каждой из волн накачки будут различны (неодинаковы), т.е.  $C_{\omega_1}(y') \neq C_{\omega_2}(y')$ , то данный метод также может быть использован, но с соответствующими измененными выражениями для волновых чисел  $k'_1(y')$  и  $k'_2(y')$  в дальнейших преобразованиях.

Функция распределения плотности источников вторичных волн должна учитывать закон изменения ВРСЗ по одной из координат  $y'$

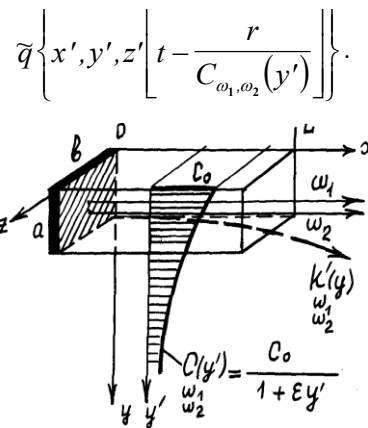


Рис. 3. Представление поперечного изменения скорости звука  $C(y')$  в водной среде в области нелинейного взаимодействия АПА

При этом последняя временная переменная может быть представлена в виде:

$$\left[ t - \frac{r}{C_{\omega_1, \omega_2}(y')} \right] = t - \left( \frac{r_0}{C_0} - \frac{x'}{C_0} \cos \theta - \frac{y'}{C_0} \sin \theta \right) (1 + \epsilon y'),$$

где  $r = r_0 - x' \cos \theta - y' \sin \theta$  – расстояние между точками расположения вторичных источников и точкой наблюдения.

Использование в этом случае метода запаздывающих потенциалов и последующее интегрирование по области нелинейного взаимодействия (ОНВ) с учетом выражения (13) при форме объема ОНВ в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами  $(a, b, \text{ и } L)$  и с законом поперечного изменения ВРСЗ  $C(y') = C_0(1 + \epsilon y')^{-1}$  (1) при  $\epsilon y' \ll 1$  позволяет получить выражение для поля давления ВРЧ с учетом его угловой зависимости



$$P_-(x, y, z, t) = \iiint_V \frac{1}{r} \tilde{q} \left\{ x', y', z' \left[ t - \frac{r}{C_{\varpi_1, \varpi_2}(y')} \right] \right\} dx' dy' dz' =$$

$$= \frac{1}{8\pi\rho_0 C_0^4 r_0} \left( 2 + \frac{B}{A} \right) (\varpi_1 - \varpi_2)^2 P_1 P_2 \cdot abL \cdot F(0, \Theta) \cdot \cos \left[ (\varpi_1 - \varpi_2) \left( t - \frac{r_0}{C_0} \right) + \frac{\pi L}{\Lambda_-} (\cos \Theta - 1) + \frac{\pi a}{\Lambda_-} \sin \Theta \right], \quad (14)$$

в котором функция направленности  $F(0, \Theta)$  есть

$$F(0, \Theta) = \frac{a}{\beta} \sin \alpha \cdot \left[ \frac{\sin \mu}{\mu} \cdot \cos(\beta L + \mu) - \frac{\sin \nu}{\nu} \cos \nu \right] +$$

$$+ \frac{a}{\beta} \cos \alpha \left[ \frac{\sin \mu}{\mu} \cdot \frac{\sin(\beta L + \mu)}{(\beta L + \mu)} (\beta L + \mu) - \left( \frac{\sin \nu}{\nu} \right)^2 \nu \right], \quad (15)$$

где  $\mu = \frac{a}{2}(\gamma + \varepsilon\beta L - \varepsilon K_- r_0)$ ,  $\nu = \frac{a}{2}(\gamma - \varepsilon K_- r_0)$ ,  $\gamma = K_- \sin \Theta$ ,  $\beta = K_- (\cos \Theta - 1)$ ,

$\alpha = \Omega t - K_- r_0$ ,  $\rho_0$  – плотность невозмущенной среды,  $\frac{B}{A}$  – параметр квадратичной нелинейности среды,  $P_{1,2}$  – давление в исходных волнах накачки,  $\Theta$  – угол отклонения от оси излучателя,  $r_0$  – расстояние от излучателя до точки наблюдения,  $\Lambda_-$  – длина волны поля ВРЧ.

Численный анализ теоретических результатов по полученному выражению функции направленности акустической параметрической антенны с ВРСЗ в поперечной координате при  $\Omega = 10,8$  кГц,  $\varepsilon = 0,5$ ,  $L = 25$  м,  $a = 0,5$  м,  $r_0 = 26$  м представлен в виде диаграммы направленности (ДН) на рис. 4, где видны основные элементы ее изменения: относительно оси излучения асимметричность ДН в целом и асимметричность самой ее формы, а также появление односторонних боковых максимумов.

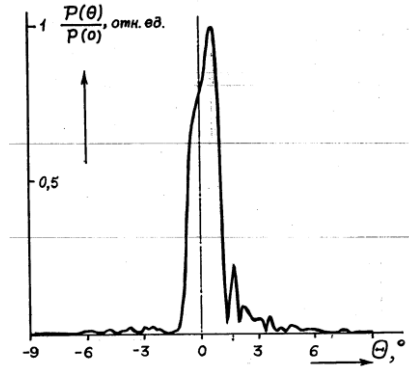


Рис. 4. Вид диаграммы направленности АПА при непрерывном поперечном распределении скорости звука по закону  $C(y') = C_0(1 + \varepsilon y')^{-1}$  при следующих параметрах  $\Omega = 10,2$  кГц;  $\varepsilon = 0,5$ ;  $L = 25$  м;  $a = 0,5$  м;  $r_0 = 25$  м

**Заключение.** Асимметрия ДН относительно направления излучения наблюдается при ограничении протяженности ОНВ наклонной плоской поверхностью [18–21], что физически соответствует разной эффективной протяженности ОНВ в направлении нелинейного взаимодействия для различных участков поверхности активного излучателя АПА. Оба эти явления во многом похоже влияют на формируемое вторичное поле ВРЧ АПА, имея при этом и свои различия.

Данный метод может быть широко использован и для других видов законов пространственного изменения зависимости вертикального распределения скорости звука первичного поля накачки в области нелинейного взаимодействия акустической параметрической антенны.

Таким образом, решена задача определения пространственных угловых зависимостей полей ВРЧ АПА при различных законах изменения ВРСЗ в нормальном сечении области нелинейного взаимодействия.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Введение в нелинейную акустику. – М.: Наука, 1966. – 519 с.
2. *Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И.* Нелинейная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1981. – 264 с.
3. *Остроумов Г.А.* Основы нелинейной акустики. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1967. – 132 с.
4. *Клей К., Медвин Г.* Акустическая океанография: основы и применение. – М.: Изд-во "Мир", 1980. – 580 с.
5. *Бейер Р.* Нелинейная акустика // В кн. Физическая акустика / под ред. Мезона У. Т. 2, ч. 8. – М.: Мир, 1969. – С. 266-301.
6. *Зверев В.А., Калачев А.И.* Измерение взаимодействия звуковых волн в жидкостях // Акустический журнал. – 1958. – Т. IV. – Вып. 4. – С. 321-324.
7. *Зверев В.А., Калачев А.И.* Измерение рассеяния звука звуком при наложении параллельных пучков // Акустический журнал. – 1968. – Т. 15. – Вып. 2. – С. 214-219.
8. *Заграй Н.П., Голосов С.П.* Экспериментальные исследования поля параметрического излучателя при наличии преграды в области взаимодействия // Сб. "Прикладная акустика". – 1983. – Вып. 9.
9. *Наугольных К.А., Островский Л.А.* Нелинейные волновые процессы в акустике. – М.: Наука, 1990. – 236 с.
10. *Лапина Э.П.* Об эффекте взаимодействия акустических волн в слоистых средах // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. – 1979. – Т. 20, № 1. – С. 85-88.
11. *Зарембо Л.К., Красильников В.А., Случ В.Н., Сухаревская О.Ю.* О некоторых явлениях при вынужденных нелинейных колебаниях акустических резонаторов // Акустический журнал. – 1966. – Т. 12. – С. 486-490.
12. *Alippi A., Bertolotti M., Ferrary A., Sette D., Sibilgia G., Zagrai N.* Behaviour of a nonlinear acoustic resonator under conditions of pulsed excitation // 12 International Congress on Acoustics, Toronto, Canada, 1986.
13. *Alippi A., Scarano G., Zagrai N.* Directivity Pattern of Parametrically Generated Acoustic Waves // ITALI, Il Nuovo Cimento. – 1987. – Vol. 9D, No. 5. – P. 489-496.
14. *Заграй Н.П.* Нелинейные взаимодействия в слоистых и неоднородных средах / под ред. академика АЕН РФ В.И. Тимошенко. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 433 с.
15. *Санчес-Паленсия Э.* Неоднородные среды и теория колебаний. – М.: Мир, 1984. – 472 с.
16. *Заграй Н.П., Павлова М.Н.* Применение метода погружения для решения задач распространения волн в неоднородной слоистой среде // НТК "Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация": Тезисы докладов. Россия, Воронеж, 1997. – Т. 1. – С. 37-40.
17. *Заграй Н.П., Голосов С.П.* Влияние преграды в области нелинейного взаимодействия акустических волн на характеристики параметрического излучателя // Сб. НТО им. А.Н. Крылова "Акустические методы исследования океана". – Л.: Судостроение, 1980. – Вып. 334. – С. 50-55.

18. *Zagrai N.P., Golosov S.P.* Поле параметрического излучателя при изменении формы области взаимодействия // В кн. "Прикладная акустика". – Таганрог, ТРТИ, 1985. – Вып. XI. – С. 32-36.
19. *Zagrai N.P., Golosov S.P.* Влияние формы области нелинейного взаимодействия на поле параметрической антенны // Научно-технический сборник: Судостроительная промышленность, серия: Акустика, ЦНИИ "Румб". – 1990. – Вып. 6. – С. 83-84.
20. *Zagrai N.P.* Пространственный анализ и синтез сигналов параметрической антенны в среде с вертикальным распределением скорости звука // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1995. – № 4. – С. 18-21.
21. *Alippi A., Scarano G., Zagrai N.* Directivity Pattern of Parametrically Generated Acoustic Waves // ITALI, Il Nuovo Cimento. – 1987. – Vol. 9D, No. 5. – P. 489-496.

#### REFERENCES

1. *Zaremba L.K., Krasil'nikov V.A.* Vvedenie v nelineynuyu akustiku [Introduction to nonlinear acoustics]. Moscow: Nauka, 1966, 519 p.
2. *Novikov B.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I.* Nelineynaya gidpoakustika [Nonlinear underwater acoustics]. Leningrad: Sudostpoenie, 1981, 264 p.
3. *Ostroumov G.A.* Osnovy nelineynoy akustiki [The fundamentals of nonlinear acoustics]. Leningrad: Izd-vo LGU, 1967, 132 p.
4. *Kley K., Medvin G.* Akusticheskaya okeanografiya: osnovy i primeneniye [Acoustical Oceanography: fundamentals and application]. Moscow: Izd-vo "Mip", 1980, 580 p.
5. *Beyer P.* Nelineynaya akustika [Nonlinear acoustics], V kn. *Fizicheskaya akustika* [In the book "Physical acoustics"], ed. by Mezona U. Vol. 2, Part 8. Moscow: Mir, 1969, pp. 266-301.
6. *Zverev V.A., Kalachev A.I.* Izmerenie vzaimodeystviya zvukovykh voln v zhidkostyakh [Measurement of the interaction of sound waves in liquids], *Akusticheskij zhurnal* [Akusticheskij zhurnal], 1958, Vol. IV, Issue 4, pp. 321-324.
7. *Zverev V.A., Kalachev A.I.* Izmerenie rasseyaniya zvuka zvukom pri nalozhenii parallel'nykh puchkov [Measurement of sound scattering sound when applying the parallel beams], *Akusticheskij zhurnal* [Akusticheskij zhurnal], 1968, Vol. 15, Issue 2, pp. 214-219.
8. *Zagray N.P., Golosov S.P.* Eksperimental'nye issledovaniya polya parametricheskogo izluchatelya pri nalichii ppepady v oblasti vzaimodeystviya [Experimental study of the field of a parametric radiator in the presence of obstacles in the interaction region], *Sb. "Ppikladnaya akustika"* [A collection of "App phonics"], 1983, Issue 9.
9. *Naugol'nykh K.A., Ostrovskiy L.A.* Nelineynye volnovye protsessy v akustike [Nonlinear wave processes in acoustics]. Moscow: Nauka, 1990, 236 p.
10. *Lapina E.P.* Ob effekte vzaimodeystviya akusticheskikh voln v sloistykh sredakh [About the effect of the interaction of acoustic waves in layered media], *Vestnik MGU. Ser. 3. Fizika. Astronomiya* [MSU Vestnik. Series 3. Physics. Astronomy], 1979, Vol. 20, No. 1, pp. 85-88.
11. *Zaremba L.K., Krasil'nikov V.A., Sluch V.N., Sukharevskaya O.Yu.* O nekotorykh yavleniyakh pri vynuздennykh nelineynykh kolebaniyakh akusticheskikh rezonatorov [Some phenomena in the forced nonlinear vibrations of acoustic resonators], *Akusticheskij zhurnal* [Akusticheskij zhurnal], 1966, Vol. 12, pp. 486-490.
12. *Alippi A., Bertolotti M., Ferrary A., Sette D., Sabilia G., Zagrai N.* Behaviour of a nonlinear acoustic resonator under conditions of pulsed excitation, *12 International Congress on Acoustics, Toronto, Canada, 1986.*
13. *Alippi A., Scarano G., Zagrai N.* Directivity Pattern of Parametrically Generated Acoustic Wave, *ITALI, Il Nuovo Cimento*, 1987, Vol. 9D, No. 5, pp. 489-496.
14. *Zagray N.P.* Nelineynye vzaimodeystviya v sloistykh i neodnorodnykh sredakh [The nonlinear interaction in layered and inhomogeneous media], ed. by akademika AEN RF V.I. Timoshenko. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 433 p.
15. *Sanches-Palensiya E.* Neodnorodnye sredy i teoriya kolebaniy [Inhomogeneous media and theory of oscillations]. Moscow: Mir, 1984, 472 p.
16. *Zagray N.P., Pavlova M.N.* Primeneniye metoda pogruzheniya dlya resheniya zadach rasprostraneniya voln v neodnorodnoy sloistoy srede [The use of dipping method for solving problems of wave propagation in inhomogeneous layered medium], *NTK "Radio i volokonno-opticheskaya svyaz', lokatsiya i navigatsiya": Tezisy dokladov. Rossiya, Voronezh, 1997* [Scientific-technical conference "Radio and fiber optical communications, location and navigation": Abstracts. Russia, Voronezh 1997], Vol. 1, pp. 37-40.

17. Zagray N.P., Golosov S.P. Vliyanie pregrady v oblasti nelineynogo vzaimodeystviya akusticheskikh voln na kharakteristiki parametricheskogo izluchatelya [The effect of obstacles in the field of nonlinear interaction of acoustic waves on the characteristics of the parametric emitter], *Sb. NTO im. A.N. Krylova "Akusticheskie metody issledovaniya okeana"* [The collection NTO them. A. N. Krylov "Acoustic methods of ocean."]. Leningrad: Sudostroenie, 1980, Issue 334, pp. 50-55.
18. Zagray N.P., Golosov S.P. Pole parametricheskogo izluchatelya pri izmenenii formy oblasti vzaimodeystviya [Field parametric emitter if you change the shape of the interaction region], *V kn. "Prikladnaya akustika"* [In book "Applied acoustics"]. Taganrog, TRTI, 1985, Issue XI, pp. 32-36.
19. Zagray N.P., Golosov S.P. Vliyanie formy oblasti nelineynogo vzaimodeystviya na pole parametricheskoy anteny [The influence of the shape of the region of nonlinear interaction on the field parametric antenna], *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik: Sudostroitel'naya promyshlennost', seriya: Akustika, TsNII "Rumb"* [Scientific and technical collection: Ship-building industry, series: Phonics, CRI "RUMB"], 1990, Issue 6, pp. 83-84.
20. Zagray N.P. Prostranstvennyy analiz i sintez signalov parametricheskoy anteny v srede s vertikal'nym raspredeleniem skorosti zvuka [Spatial analysis and synthesis signals of the parametric antenna in a medium with vertical distribution of the speed of sound], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 1995, No. 4, pp. 18-21.
21. Alippi A., Scarano G., Zagrai N. Directivity Pattern of Parametrically Generated Acoustic Waves, *ITALI, Il Nuovo Cimento*, 1987, Vol. 9D, No. 5, pp. 489-496.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.П. Рыжов.

**Заграй Николай Петрович** – Южный федеральный университет; e-mail: znp@sfnu.ru; 347925, г. Таганрог, ул. К. Либкнехта, 93а; тел.: 88634379879; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

**Zagray Nikolay Petrovitch** – Southern Federal University; e-mail: znp@sfnu.ru; 193a, Libknehta street, Taganrog, 347925, Russia; phone: +78634379879; the department of hydroacoustics and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.883.02.024

DOI 10.23683/2311-3103-2017-8-162-171

**И.И. Маркович, Е.Е. Завтур**

### **АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫМ МЕТОДОМ С УЧЕТОМ НЕТОЧНОСТЕЙ УСТАНОВКИ ПРИЕМНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН**

*На практике в пассивных гидроакустических системах для определения координат подводных и надводных объектов широкое распространение получил разностно-дальномерный метод (РДМ). Данный метод основан на использовании разностей расстояний от объекта до трех коллинеарных антенн с известными координатами. Для определения разности расстояний с помощью вычисления взаимно-корреляционных функций принятых шумоподобных сигналов измеряются временные задержки между поступлениями сигналов на каждую антенну. Существенным недостатком разностно-дальномерного метода является условие коллинеарного расположения трех приемных антенн с симметричной антенной базой, что представляет собой довольно трудную задачу при базах составляющих сотни метров. При несоблюдении этого требования погрешности определения координат цели значительно возрастают. В связи с этим практическую ценность для разработчиков гидроакустических систем представляет алгоритм, который позволяет рассчитать координаты цели для случая неколлинеарного*