

Выходной сигнал линейного зависит от  $m$ , т.е. амплитуды принимаемого параметрической антенной акустического сигнала. Кроме того, неопределенность фазы принимаемой волны накачки не влияет на величину выходного напряжения. Таким образом, при обработке сигналов приемной параметрической антенны предпочтительней применять квадратурную схему устройства обработки (см. рис. 2).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лепендин Л.Ф.* Акустика: Учеб. пособие для втузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 448 с.
2. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика: Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
3. *Тарасов С.П., Воронин В.А., Тимошенко В.И.* Нелинейная акустика в океанологии. Монография / Под ред. Кузнецова В.П. – М.: Физматлит, 2010. Применение гидроакустических систем с параметрическими антеннами в океанологических исследованиях. – Дополнение. – С. 183-254.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.И. Турулин.

**Воронин Артем Васильевич** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: eha@fep.tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; ассистент.

**Воронин Василий Алексеевич** – e-mail: eha@fep.tsure.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

**Voronin Artem Vasilievich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: eha@fep.tsure.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of hydroacoustic and medical engineering; assistant.

**Voronin Vasily Alekseevich** – e-mail: eha@fep.tsure.ru; the department of hydroacoustic and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 534.222.2

**А.В. Воронин, В.А. Воронин**

#### **ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЕМНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ В КИЛЬВАТЕРНОЙ СТРУЕ**

*В работе представлены характеристики приемной параметрической антенны, работающей в кильватерной струе. Показано, что возникновение кавитации приводит к появлению в среде значительной дисперсии фазовой скорости распространения волн. Показано, в жидкой среде с пузырьками кроме нелинейности гидродинамического характера появляются эффекты, вызванные нелинейными колебаниями пузырька. Применены полученные уравнения для исследования распространения волны накачки в приемной параметрической антенне. Приведены зависимости фазовой скорости звука в морской воде от частоты и концентрации воздушных пузырьков. Показаны изменения характеристики направленности в такой среде для параметрической приемной антенны. Параметрическая антенна, кавитация, взаимодействие акустических волн.*

*Параметрическая антенна; кавитация; взаимодействие акустических волн.*

A.V. Voronin, V.A. Voronin

**PARAMETRIC DATA RECEIVING ANTENNA EDDY WATER**

*In work characteristics of the reception parametrical aerial working in a swirl are submitted. It is shown that occurrence cavitation leads to occurrence in the environment of a considerable dispersion of phase speed of distribution of waves. It is shown, in the liquid environment with vials except nonlinearity of hydrodynamic character there are the effects caused by nonlinear fluctuations of a vial. The received equations are applied to research of distribution of a wave of a rating in the reception parametrical aerial. Dependences of phase speed of a sound in sea water from frequency and concentration of air vials are resulted. Changes of the characteristic of an orientation in such environment for the parametrical reception aerial are shown.*

*Parametrical array; cavitation; interaction of acoustic waves.*

При проведении геофизических работ по поиску полезных ископаемых достаточно часто применяют приемные гидроакустические антенны в виде буксируемых гибких антенн, состоящих из отдельных преобразователей, размещенных в звукопрозрачных шлангах, заполненных жидкостью. Такие антенны буксируются за носителем, будь то судно, или автономный подводный аппарат. При этом антенная система неизбежно находится в кильватерной среде носителя, эта среда характеризуется наличием большого количества разнообразных по размерам пузырьков, образующихся в результате кавитации. Возникновение кавитации в свою очередь, приводит к появлению в среде значительной дисперсии фазовой скорости распространения волн. Соответствующая дисперсионная зависимость для плоской волны имеет вид [1–]:

$$k = \frac{\omega}{c_0} \left( 1 + \frac{4\pi n R_0 c_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\mu\omega} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $k$  – волновое число;  $\omega$  – частота волны;  $c_0$  – скорость звука в жидкости без кавитации;  $n$  – количество пузырьков в единице объема жидкости;  $R_0$  – равновесный радиус пузырька;  $\omega_0$  – резонансная частота пузырька [1–3];  $\mu$  – коэффициент затухания колебаний пузырька.

Если концентрация пузырьков в жидкости невелика, т.е.  $|4\pi n R_0 c_0^2 / (\omega_0^2 - \omega^2 - i\mu\omega)| < 1$ , выражение (1) можно упростить и привести к виду

$$k = \frac{\omega}{c_0} \left( 1 + \frac{2\pi n R_0 c_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\mu\omega} \right). \quad (2)$$

Рассмотрим область частот  $\omega < \omega_0$  при условии  $\mu < \omega_0$ . В этом случае

$$k = \frac{\omega}{c} + ib\omega^2 + d\omega^3, \quad (3)$$

где  $c = c_0 (1 + 2\pi n R_0 \tilde{n}_0^2 / \omega_0^2)^{-1}$ ,  $b = 2\pi n R_0 c_0 \mu / \omega_0^4$ ,  $d = 2\pi n R_0 c_0 / \omega_0^4$ .

В линейном приближении для волны колебательной скорости  $u(x, \tau)$ , распространяющейся вдоль оси  $x$  в положительном направлении, в системе координат, движущейся в том же направлении со скоростью  $c$ , имеет место следующее уравнение в соответствии с дисперсионным соотношением (3) (в переменных  $x, \tau = t - x/c$ ):

$$\frac{\partial u}{\partial x} = b \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + d \frac{\partial^3 u}{\partial \tau^3}. \quad (4)$$

В жидкой среде с пузырьками, кроме нелинейности гидродинамического характера, появляются эффекты, вызванные нелинейными колебаниями пузырька. Оценки показывают, что вблизи резонанса эта нелинейность может играть главную роль; од-

нако, вдали от резонансной частоты пузырька, при  $\omega > \omega_0$  и  $\omega < \omega_0$ , ею можно пренебречь и поэтому будем учитывать лишь гидродинамическую нелинейность.

Таким образом, полное уравнение, описывающее распространение плоских нелинейных волн в жидкости при кавитации, имеет вид

$$\frac{\partial u}{\partial x} - au \frac{\partial u}{\partial \tau} = b \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + d \frac{\partial^3 u}{\partial \tau^3}, \quad (5)$$

где  $a=(\gamma+1)/2c^2$ ,  $\gamma=c_p/c_v$ ;  $b$  – коэффициент затухания, учитывающий как затухание волн в среде, характеризуемое коэффициентом [1–3].

$$b' = \frac{1}{2\rho_0 c_0^3} \left[ \frac{4}{3} \eta + \zeta + \chi \left( \frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right],$$

так и потери при колебаниях пузырьков, определяемые коэффициентом  $b'' = 2\pi R_0 c_0 \mu / \omega_0^4$  (вдали от резонанса пузырьков  $b = b' + b''$ );  $d = 2\pi R_0 c_0 / \omega_0^4$  – параметр дисперсии, зависящий от размера пузырьков и их концентрации. Здесь  $\eta$  – коэффициент сдвиговой вязкости,  $\zeta$  – коэффициент объемной вязкости,  $\chi$  – коэффициент теплопроводности,  $c_v$  и  $c_p$  – теплоемкость при постоянном объеме и постоянном давлении соответственно.

Применим полученное уравнение для исследования распространения волн накачки в приемной параметрической антенне.

Использование приемных параметрических антенн в кавитирующей жидкости приводит к тому, что взаимодействие волн накачки с принимаемой волной сигнала происходит в среде, насыщенной пузырьками.

Поскольку приемная параметрическая антенна представляет собой антенну бегущей волны, то изменение фазовой скорости волны накачки вследствие дисперсии в такой антенне приведет к изменению характеристики направленности такой антенны. Характеристика направленности может быть аппроксимирована следующим выражением [4]:

$$R(\theta) = \int_0^L e^{i\alpha(x)} \cdot e^{ikx(1-\cos\theta)} dx, \quad (6)$$

где  $L$  – длина антенны (расстояние между излучающим и приемным преобразователями накачки;  $\alpha(x) = \beta x$ ,  $\beta = \frac{\omega}{c}$ ;  $c$  – фазовая скорость волны накачки;

$k = \frac{\omega}{c_0}$  – волновое число;  $\omega$  – круговая частота волны накачки,  $c_0$  – скорость

звука в среде без дисперсии;  $\theta$  – угол между направлением падения волны на антенну и осью антенны (ось  $x$ ), при этом  $\cos \theta = \frac{\beta}{k} = \frac{c_0}{c}$ .

В параметрической приемной антенне длина антенны незначительная, поэтому затуханием волн накачки в уравнении (5) можно пренебречь, кроме того, вне резонансной области пузырька затуханием колебаний пузырька тоже пренебрегаем. Тогда из выражения (3) можно определить фазовую скорость волны как

$$c = c_0 / (1 + 2\pi n R_0 c_0^2 / \omega_0^2). \quad (7)$$

Используем это соотношение для вычисления характеристики направленности приемной параметрической антенны в среде с пузырьками, образовавшимися в результате кавитации – в кильватерной струе. Для этого проанализируем поведения фазовой скорости волны накачки, в зависимости от частоты накачки.

На рис. 1 приведена зависимость фазовой скорости звука в морской воде от частоты при двух различных концентрациях воздушных пузырьков ( $n=10^3, 10^4$ ) радиусом от  $2 \cdot 10^{-5}$  см до  $2 \cdot 10^{-3}$  см.

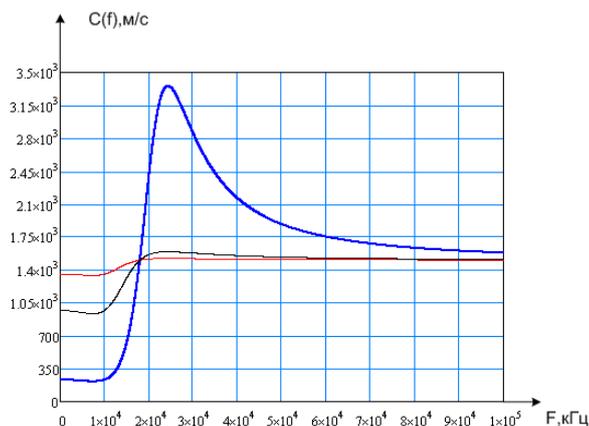


Рис. 1. Зависимость фазовой скорости звука в морской воде от частоты при концентрации воздушных пузырьков  $n=10^2, 10^3, 10^4$  радиусах пузырьков от  $2 \cdot 10^{-5}$  см до  $2 \cdot 10^{-3}$  см

Проанализируем изменение характеристики направленности в такой среде для параметрической приемной антенны. На рис. 2 приведены диаграммы направленности антенны в среде без пузырьков со скоростью звука 1500 м/с (кривая 1) и в среде с концентрацией пузырьков  $n=10^4$  (кривая 2). При этом фазовая скорость волны накачки на частоте 20 кГц составляет 1500 м/с, а на частоте сигнала 1473 м/с.

Анализ диаграмм направленности показывает, что работа параметрической приемной антенны с такими параметрами в дисперсионной среде приводит к изменению формы характеристики направленности. В направлении оси антенны бегущей волны появляется провал в характеристике направленности, причем, чем выше разность фазовых скоростей волны накачки и волны сигнала, тем больше провал.

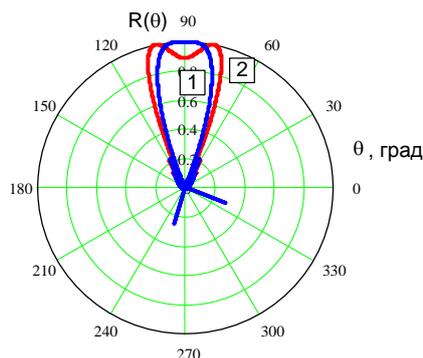


Рис. 2. Диаграммы направленности параметрической антенны

Изменение формы характеристики направленности является информативным параметром о наличии в среде растворенных газовых пузырьков и их концентрации, что важно при экологических исследованиях водных акваторий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тарасов С.П., Воронин В.А., Тимошенко В.И.* Нелинейная акустика в океанологии. Монография / Под ред. Кузнецова В.П. – М. Физматлит, 2010. Применение гидроакустических систем с параметрическими антеннами в океанологических исследованиях. – Дополнение. – С. 183-254.
2. *Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И.* Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат. 2004. – 400 с.
3. *Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И.* Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2007. – 448 с.
4. *Воронин А.В., Тарасов С.П., Кузнецов В.П.* Использование приемных параметрических антенн в исследованиях характеристик водных акваторий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 6 (95). – С. 123-126.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.И. Турулин.

**Воронин Артем Васильевич** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: eha@fep.tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; ассистент.

**Воронин Василий Алексеевич** – e-mail: eha@fep.tsure.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

**Voronin Artem Vasilievich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: eha@fep.tsure.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of hydroacoustic and medical engineering; assistant professor.

**Voronin Vasily Alekseevich** – e-mail: eha@fep.tsure.ru; the department of hydroacoustic and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 551.524+551.508.5

**Я.В. Гицба, Я.А. Экба**

### ТЕНДЕНЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АБХАЗСКОЙ АКВАТОРИИ ЧЕРНОГО МОРЯ

*На термический режим моря в теплый сезон наибольшее влияние оказывает солнечная инсоляция поверхностных вод и тепло-массообмен с поверхностью суши. За последние 20 лет наблюдается существенное повышение среднегодовой температуры поверхностных вод абхазской акватории на 0,8 °С. Среднее многолетнее повышение солёности составляет (3,12 %), что находится в пределах сезонной изменчивости солёности. Коэффициент корреляции между изменением солёности и речным стоком оказался высоким  $r=-0,82$ . В осенне-зимний сезон преобладает волнение южного направления, со средним максимальным значением зимой (27,2 %) и средним минимальным значением осенью (25,9 %). Наибольшая повторяемость волнения моря юго-западного направления наблюдается весной (24,7–27,9 %).*

*Температура; солёность; ветровой режим; волнение моря; атмосферные осадки; речной сток.*