

## Раздел I. Акустика и гидроакустика

УДК 534.222.2

**В.А. Воронин, А.В. Воронин, С.С. Снесарев**

### **ИЗЛУЧАЮЩАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АНТЕННА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ**

*Рассматриваются вопросы нелинейного взаимодействия акустических волн в воздушной среде в процессе распространения. Показывается, что коэффициент нелинейности в воздушной среде значительно превышает таковой в воде, поэтому генерация вторичных волн в воздушной среде эффективнее чем в воде. Рассчитываются основные характеристики взаимодействия. Для реализации параметрической антенны для передачи информации узким лучом предлагается использовать в качестве преобразователей в антенне накачки высокочастотные громкоговорители с высокой чувствительностью в режиме излучения. Для уменьшения уровня боковых лепестков в характеристике направленности антенны накачки даются рекомендации по расположению преобразователей в антенне накачки и согласованию их со средой с помощью акустических рупоров. В качестве исходных параметров для расчетов выбираются паспортные данные громкоговорителей. Анализируются характеристики параметрической антенны при расположении ее в воздушном потоке. Взаимодействие волн в потоке описывается неоднородным волновым уравнением, в котором влияние потока оценивается членом с конвективной производной. Рассмотрены неоднородные уравнения для различных составляющих результирующего генерируемого сигнала параметрической антенной в среде с воздушным потоком. Выведены выражения для расчета добавок к генерируемым в однородной среде сигналам для перпендикулярного и параллельного направлению распространения волн потока. Показано, что воздушный поток в ближней зоне антенны накачки увеличивает амплитуду генерируемых нелинейным взаимодействием вторичных волн. Даются рекомендации по использованию параметрической антенны для передачи информации в воздушной среде.*

*Параметрическая антенна; воздушная среда; преобразователь накачки; воздушный поток; волновое уравнение.*

**V.A. Voronin, A.V. Voronin, S.S. Snesarev**

### **FEATURES OF INTERACTION OF ACOUSTIC WAVES IN THE AIR ENVIRONMENT**

*In article questions of nonlinear interaction of acoustic waves in the air environment in the course of distribution are considered. It is shown, that the nonlinearity coefficient in the air environment considerably exceeds that in water therefore generation of secondary waves in the air environment is more effective than in water. The main characteristics of interaction pay off. For realization of the parametrical antenna for information transfer the narrow beam offers to use as converters in the rating antenna high-frequency loudspeakers with high sensitivity in the radiation mode. For reduction of level of side petals in the characteristic of an orientation of the antenna of a rating are given the recommendation about an arrangement of converters in the antenna of a rating and to their coordination with Wednesday by means of acoustic loud-hailers. As initial parameters for calculations passport data of loudspeakers get out. Characteristics of the parametrical antenna at its arrangement in air streams are analyzed. Interaction of waves in a stream is described by the non-uniform wave equation in which the member from a convective derivative estimates influence of a stream. Are considered the non-uniform equations for various working out*

*the resultant generated signal the parametrical antenna in the environment with an air stream. Expressions for calculation of additives to the signals generated in a homogeneous environment for distribution of waves of a stream perpendicular and parallel to the direction are removed. It is shown that the air stream in a near zone of the antenna of a rating increases amplitude of the secondary waves generated by nonlinear interaction. Recommendations about use of the parametrical antenna for information transfer in the air environment are made.*

*Parametrical antenna; air environment; rating converter; air stream; wave equation.*

**Введение.** В настоящее время получили широкое распространение акустические приборы для дистанционного исследования нижних слоев атмосферы с целью определения различных ее параметров [1]. Результаты исследования существенно зависят от существующих условий распространения звука в атмосфере [2] и от параметров излучающих систем. Причина различий результатов исследований заключается в высокой чувствительности распространяющегося звукового излучения в атмосфере к таким параметрам как скорость и направление ветра, температура, влажность, атмосферное давление и их изменения по трассе распространения волн с одной стороны и наличие таких характеристик излучающих систем как уровень боковых лепестков в характеристике направленности, зависимость параметров характеристики направленности от частоты излучаемых волн и параметров атмосферы [3].

Для устранения различий результатов исследований от параметров атмосферы применяют многочастотные системы. Однако традиционные антенные решетки, обычно применяемые в содарах, имеют существенные недостатки, такие как зависимость ширины характеристики направленности от частоты излучаемых сигналов, большие размеры активной поверхности на низких частотах при узких характеристиках направленности. Такие решетки невозможно установить на передвижных носителях, особенно на воздушных.

Задачей исследований является научное обоснование системы экологического мониторинга приземного слоя атмосферы, позволяющей устранить недостатки существующих акустических систем. Это возможно с применением излучающих антенн, работающих на основе взаимодействия волн, распространяющихся в нелинейной среде.

Новый класс излучателей – параметрические излучающие антенны – имеют существенные преимущества перед традиционными [4–7]. В параметрических антеннах излучение ведется антеннами накачки на достаточно высоких частотах, а колебания рабочих частот возникают в среде за счет нелинейного взаимодействия волн накачки в канале распространения. В результате виртуальная антенна обладает такими характеристиками как малый уровень боковых лепестков (порядка минус 50 дБ), широкий диапазон излучаемых частот (две и более октавы), узкую, не зависящую от частоты излучения характеристику направленности и малые габариты антенной системы, поскольку излучение ведется на частотах накачки. Однако недостатками такой виртуальной антенны являются сильная зависимость уровня излучаемых волн от частоты, и параметров взаимодействия в условиях изменяющейся атмосферы.

**Коэффициенты нелинейности для водной и воздушной сред.** В монографиях [8, 9] рассмотрены вопросы взаимодействия акустических волн в канале распространения, построения излучающих параметрических антенн, их характеристики и сферы применения в гидроакустике.

Взаимодействие акустических волн в канале распространения можно рассмотреть, используя неоднородное волновое уравнение [8, 9].

$$\Delta P - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = - \frac{\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \frac{\partial^2 (P_0^2)}{\partial t^2},$$

где  $\varepsilon$  – нелинейный параметр;  $P$  – звуковое давление;  $z$  – координата вдоль распространения волны;  $P_0$  – звуковое давление волн накачки;  $c_0$  и  $\rho_0$  – скорость звука и плотность среды.

Правая часть этого уравнения описывает виртуальные источники, образованные за счет взаимодействия (самовоздействия) первичных волн (волн накачки). Вторая производная по времени от квадрата звукового давления волн накачки описывает амплитуды и спектральный состав генерируемых волн, а коэффициент перед производной эффективности генерации вторичных волн. Сравним как различаются эти коэффициенты для воздушной среды и водной среды при равных значениях амплитуд волн накачки. Для сравнения примем скорости звука в воде и воздухе равными 1500 и 340 м/с, а плотность 1000 и 1,29 кг/м<sup>3</sup>. Нелинейный параметр для воды  $\varepsilon = 3,5$ , а для воздуха  $\varepsilon = 1,2$ .

В результате для воды этот коэффициент приблизительно равен  $6,9 \cdot 10^{-13}$ , а для воздуха –  $6,9 \cdot 10^{-8}$ . Следовательно, генерация вторичных волн в воздухе в точке происходит значительно эффективнее, чем в воде. Эффект накопления результатов взаимодействия по мере распространения может изменить это соотношение из-за разных длин взаимодействующих волн, разных соотношений частот генерируемых и взаимодействующих волн, разного затухания, однако эти эффекты не приводят к существенному изменению эффективности генерации волн в воде и воздухе. Этот результат отличается от сравнений, приведенных в [10], где указывается обратное, исходя из нелинейного параметра среды и высокого затухания в воздухе.

Для реализации параметрической антенны в воздушной среде выберем в качестве преобразователей для антенны накачки высокочастотные громкоговорители HertzST 25, собранные в антенну накачки. Такие громкоговорители имеют следующие характеристики: чувствительность в режиме излучения 107 дБ/2,83 В/м, пиковая мощность 100 Вт. Номинальное сопротивление 4 Ом, диапазон частот 3000–20000 Гц, диаметр корпуса 43,5 мм, диаметр излучающей поверхности 25 мм. Эти параметры преобразователей накачки позволят реализовать эффективную параметрическую антенну в воздушной среде [11]. Расчет характеристик параметрической антенны с такими преобразователями необходимо вести из расчета, что интенсивность излучения с поверхности антенны будет меньше из-за распределения ее между излучающими поверхностями преобразователей и не активной части поверхности антенны. Для уменьшения боковых лепестков в характеристике направленности антенны накачки можно рекомендовать применение рупоров для равномерного распределения излучаемой энергии по поверхности антенны накачки.

При выборе частот накачки в диапазоне 18–20 кГц и ширине пучка 3 градуса диаметр антенны накачки составит не более 35 см.

**Решение задачи взаимодействия акустических волн в средах с гидродинамическим потоком.** Взаимодействие волн в стационарной среде достаточно хорошо описано в многочисленных работах [4–9]. Однако, взаимодействию волн в неоднородных средах уделялось мало внимания. Хотя результаты такого исследования найдут широкое применение при определении параметров таких сред. В частности, описание взаимодействия волн в средах с потоком позволят найти связь между скоростями движения среды и амплитудами генерируемых в среде волн.

Ранее в [8, 9] показано, что в гидродинамическом потоке характеристики параметрической антенны меняются в зависимости от скорости и направления потока. Рассмотрим влияние воздушных потоков на характеристики параметрической излучающей антенны.

При взаимодействии волн в воздушной среде с аэродинамическим потоком особенностью является большее соотношение скорости потока и скорости распространения акустических волн и гораздо большее затухание, как волн накачки, так и волн разностной частоты. Рассмотрим характеристики поля параметрической антенны в воздушной среде.

Для анализа процесса нелинейного взаимодействия можно воспользоваться неоднородным волновым уравнением, в котором правая часть описывает нелинейное взаимодействие волн в виде суммы взаимодействий в стационарной среде и в среде с воздушными потоками.

$$\Delta P - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = - \frac{\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \frac{\partial^2 (P_0^2)}{\partial t^2} - \frac{2\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} U \nabla \frac{\partial (P_0^2)}{\partial t}, \quad (1)$$

В выражении (1) приняты следующие обозначения:  $U$  – скорость потока ось которого расположена под углом к направлению распространения акустических волн;  $\left( \frac{\partial}{\partial t} + (U, \nabla) \right)$  – конвективная производная.

Проанализируем процесс нелинейного взаимодействия коллинеарных акустических волн в среде с компактным аэродинамическим потоком, при этом под компактным потоком будем понимать поток, который имеет границы в пределах зоны взаимодействия волн накачки. С другой стороны, размеры потока много больше длин взаимодействующих волн.

Решение уравнения (1) ведется с использованием борновского приближения, которое в данном случае сводится к пренебрежению рассеянием волн накачки на градиенте плотности воздуха, обусловленной наличием градиента давления, и сжимаемостью воздуха [12]. В этом приближении рассеянное звуковое поле можно представить в виде двух составляющих, одна из которых описывает снос волны, а вторая рассеянное поле, такая интерпретация составляющих звукового давления возможна на основе анализа направления их распространения.

Решение для генерируемого поля представить в виде суммы двух составляющих

$$P = P_1 + P_2, \quad (2)$$

где  $P_1$  – низкочастотное поле, генерируемое волнами накачки в однородной среде, а  $P_2$  – добавка к низкочастотному полю за счет влияния движения среды.

Эти два эффекта, за счет которых появляются источники, являются эффектами одного порядка малости – второго, и, следовательно, их можно представить аддитивными.

Решения для  $P_1$  и  $P_2$  можно найти из уравнений

$$\Delta P_1 - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P_1}{\partial t^2} = - \frac{\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \frac{\partial^2 (P_0^2)}{\partial t^2}, \quad (3)$$

$$\Delta P_2 - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P_2}{\partial t^2} = - \frac{2\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} U \nabla \frac{\partial (P_0^2)}{\partial t}. \quad (4)$$

Решения (3) и (4) не учитывают явление дифракции и диссипации волн накачки и генерируемых волн и могут быть использованы для анализа поля генерируемых волн в ближней зоне параметрической антенны.

Для решения задачи взаимодействия волн с учетом дифракционных и диссипативных эффектов будем использовать уравнение Хохлова-Заболоцкой-Кузнецова (ХЗК), которое описывает взаимодействие волн в ограниченных звуко-

вых пучках в рамках квазиоптического приближения. Заметим, что квазиоптическое приближение не рассматривает рассеяние первичных волн на неоднородностях среды [8, 9].

$$\Delta P - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{b}{c_0^2 \rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \Delta_{\perp} P = -\frac{\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \frac{\partial^2 (P_0^2)}{\partial t^2} - \frac{2\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} (U \nabla \frac{\partial (P_0^2)}{\partial t}). \quad (5)$$

Запишем уравнения для  $P_1$  и  $P_2$  как

$$\Delta P_1 - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P_1}{\partial t^2} + \frac{b}{c_0^2 \rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \Delta_{\perp} P_1 = -\frac{\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \frac{\partial^2 (P_0^2)}{\partial t^2} \quad (6)$$

$$\Delta P_2 - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P_2}{\partial t^2} + \frac{b}{c_0^2 \rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \Delta_{\perp} P_2 = -\frac{2\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \left( \bar{U}, \nabla \frac{\partial (P_0^2)}{\partial t} \right). \quad (7)$$

Решение уравнения (11) для взаимодействия волн в среде без потока получено в виде [8, 9].

Уравнение (7) описывает звуковое поле, возникающее благодаря потоку. Поскольку правые части уравнений (5) и (6) имеют один и тот же порядок малости и одинаковую физическую интерпретацию их решения ведется также методом последовательных приближений.

Звуковое поле, полученное в результате взаимодействия волн в потоке, можно представить в виде двух составляющих, одна из которых описывает снос волны, а вторая рассеянное поле, такая интерпретация составляющих звукового давления возможна на основе анализа направления их распространения. Таким образом, с учетом борновского приближения представим искомое решение для  $P_2$  в виде суммы двух компонент

$$P_2 = P_r + P_z, \quad (8)$$

где  $P_z$  – вклад продольной составляющей вектора скорости неоднородного аэродинамического потока,  $P_r$  – вклад поперечной составляющей вектора скорости потока.

Решая уравнение, получим выражение для  $P_r$  в виде [13–21]

$$P_r(r, z) = \left( -\frac{2\varepsilon}{c_0^3 \rho_0} \right) \int_0^z e^{-\alpha z'} \int_0^{\infty} A(r', z') U_r \frac{\partial A}{\partial r'} \int_0^{\infty} J_0(v, r') \times \\ \times J_0(v, r) v \exp\left( i \frac{v^2}{2k} (z - z') \right) dv dr' dz' \quad (9)$$

а для  $P_z$  в виде

$$P_z(r, z) = \left( -\frac{2\varepsilon}{c_0^3 \rho_0} \right) \int_0^z e^{-\alpha z'} \int_0^{\infty} A(r', z') U_z \frac{\partial A}{\partial z'} \int_0^{\infty} J_0(v, r') \times \\ \times J_0(v, r) v \exp\left( i \frac{v^2}{2k} (z - z') \right) dv dr' dz' \quad (10)$$

Выражения (9), (10) дают возможность рассчитать добавку значения поля, образованного в результате взаимодействия волн в неоднородной среде, которая суммируется с полем, образованным в результате взаимодействия волн в однородной среде. Дальнейшие преобразования полученных выражений проведем с уче-

том следующих предположений. Пусть амплитуды волн накачки распределены по поверхности преобразователя накачки по гауссовому закону. Такое предположение используется при решении задач взаимодействия в однородной среде. При таких предположениях решение уравнения первого приближения для амплитуд волн накачки будет следующим

$$A(r, z)_{1,2} = \frac{P_{01,02}}{1 - iz/l_{D1,2}} \exp\left(-\frac{r^2}{a^2} \frac{1}{1 - iz/l_{D1,2}}\right), \quad (11)$$

где  $P_{01,02}$  – максимальные значения амплитуд накачки на поверхности преобразователя, а индексы 1 и 2 означают первую и вторую взаимодействующие волны.

Будем считать, что неоднородности в виде потока занимают всю область взаимодействия волн и скорости движения частиц в потоке равномерно распределены в пространстве взаимодействия как по продольной координате, так и по поперечной. Подставляя  $A(r, z)$  в выражения (9) и (10) и выполняя интегрирование, получим выражения для расчета добавок к полю генерируемых волн для радиальной и осевой составляющих:

$$P_r = i \frac{4\varepsilon K P_0^2}{c_0^3 \rho_0} U_r \int_0^z \frac{e^{-\alpha z'}}{(1 - iz'/l_D)^2} \frac{1}{B_1} \exp\left(-i \frac{k}{2} \frac{4r^2}{B_1}\right) dz', \quad (12)$$

где  $B_1 = 4(z - z') + ia^2 k(1 - iz'/l_D)$ .

$$\begin{aligned} P_z &= \frac{4\sqrt{2\pi}\varepsilon K P_0^2 a}{c_0^3 \rho_0} U_z \int_0^z \frac{e^{-\alpha z'}}{(z - z')^{1/2} (1 - iz'/l_D)^{5/2}} \frac{1}{\sqrt{B_1}} \times \\ &\times \exp\left(\frac{-r^2 a^2 k^2 (1 - iz'/l_D)}{4B_1 (z - z')}\right) \times \\ &\times \left(2I_0\left(\frac{r^2 a^2 k^2 (1 - iz'/l_D)}{4B_1 (z - z')}\right) - I_1\left(\frac{r^2 a^2 k^2 (1 - iz'/l_D)}{4B_1 (z - z')}\right)\right) dz'. \end{aligned} \quad (13)$$

Анализируя эти выражения можно отметить, что и радиальная и осевая составляющая скорости потока вносит добавку в генерируемую волну. Однако даже ортогональный ламинарный поток влияет на эффективность процесса генерации волн, а такие потоки часто встречаются на практике при использовании параметрических антенн на движущихся носителях.

**Выводы.** Исследования, проведенные методом численного моделирования, показывают, что эффективность процесса нелинейного взаимодействия в среде с потоком увеличивается. Зависимости имеют характерный для взаимодействия волн в ограниченных пучках вид – нарастание амплитуды добавки в ближней зоне антенны накачки за счет преобладания процессов генерации волн над остальными процессами, стабилизация в переходной зоне за счет конкуренции процессов генерации и дифракции и спадание в дальней зоне за счет преобладания процессов дифракции и затухания. Необходимо отметить, что фазы добавок к полю за счет потока воздуха вблизи поверхности антенны накачки различны. Так добавка за счет поперечной составляющей потока имеет одинаковую начальную фазу с волной разностной частоты, генерируемой в однородной среде, а фаза добавки за счет продольной составляющей потока отличается на  $\pi/2$ , поэтому суммарная добавка имеет амплитуду меньшую, чем суммы амплитуд добавок. Скорость звука и затухание волн накачки в средах с потоком и без различаются незначительно. Следует

ожидать, что неоднородности в виде потоков не окажут существенного влияния на характеристику направленности параметрической антенны, так как не изменяется длина зоны взаимодействия волн накачки.

Таким образом, наличие неоднородностей в среде ведет к изменению параметров среды и параметров процесса нелинейного взаимодействия волн накачки с акустическими полями и полями другой природы (пример – взаимодействие волн в однородной среде и среде с потоком воздуха). Разработанный единый подход к решению задачи нелинейного взаимодействия позволяет получить необходимые для анализа зависимости в каждом конкретном случае. Показано, что применение такого подхода приводит как к результатам, полученным другими методами, так и к оригинальным решениям, как в случае с воздушным потоком.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kallistratova M.A., Kouznetsov R.D.* Low-level jets in the Moscow region in summer and winter observed with a sodar network // *Boundary-layer Meteorology*. – 2012. – Vol. 143. – P. 159-175.
2. *Красненко Н.П.* Приземное распространение звуковых волн в атмосфере // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 2 (28). – С. 86-94.
3. *Красненко Н.П.* Методы и средства дистанционного акустического зондирования атмосферы // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2009. – № 11. – С. 143-154.
4. *Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И.* Нелинейная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1981. – 264 с.
5. *Новиков Б.К., Тимошенко В.И.* Параметрические антенны в гидролокации. – Л.: Судостроение, 1990. – 256 с.
6. *Грабарь А.Г., Захаров И.С., Тимошенко В.И.* История гидроакустики. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2002. – 560 с.
7. *Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тимошенко В.И.* Акустические океанологические исследования и экспедиции. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2002. – 484 с.
8. *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.
9. *Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И.* Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 400 с.
10. *Куличков С.Н.* Нелинейная генерация низкочастотной компоненты при распространении в атмосфере интенсивной модулированной звуковой волны // *Физика атмосферы и океана*. – 1979. – Т. 15, № 4. – С. 384-391.
11. *Бодрягин В.И., Дугин В.В.* К определению оптимальных рабочих частот и размеров параметрического излучателя // *Вестник Киевского политехнического института. Электроакустика и звукотехника*. – 1987. – № 11. – С. 13-15.
12. *Кузнецов В.П.* Уравнения нелинейной акустики // *Акустический журнал*. – 1970. – Т. 16, № 4. – С. 548.
13. *Наугольных К.А., Рыбак С.А., Скрынников Ю.И.* О нелинейном взаимодействии акустических волн в неоднородном потоке жидкости // *Акустический журнал*. – 1993. – Т. 39, № 2. – С. 321-325.
14. *Дмитриев В.Г., Наугольных К.А.* Поле параметрического излучателя в волноводе с плавнонеоднородным потоком жидкости // *Акустический журнал*. – 1994. – Т. 40, № 3. – С. 385-389. – 1975. – Т. 43, № 1. – Р. 109-116.
15. *Блохинцев Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды. – М.: Наука, 1981. – 206 с.
16. *Воронин В.А., Кириченко И.А.* О влиянии потока жидкости с пульсациями давления на поле параметрического излучателя // *Материалы Всероссийской НТК "Медицинские информационные системы"*. – Таганрог: ТРТУ, 1995. – Вып. 5 (XII). – С. 29-34.
17. *Воронин В.А., Кириченко И.А.* Экспериментальное исследование неоднородного гидродинамического потока на характеристики параметрической антенны // *Труды ТРТУ: Материалы ХLI НТК*. – Таганрог: ТРТУ, 1995.

18. Кириченко И.А. К вопросу о влиянии неоднородностей водной среды на характеристику направленности параметрической излучающей антенны // Материалы Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов "Новые информационные технологии. Информационное, программное и аппаратное обеспечение". – Таганрог: ТРТУ, 1995. – С. 169-170.
19. Воронин В.А., Кириченко И.А. Параметрическая антенна для экологических исследований водной среды // Материалы Международной конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы охраны окружающей среды": Тезисы докладов. Т. 1. – Томск: ТГУ, 1995. – С. 27-28.
20. Voronin V.A., Kirichenko I.A. Parametric array for ecological investigations of water medium // International Conference POOS-95, September 12-16, 1995. Tomsk. – P. 62-63.
21. Воронин В.А., Кириченко И.А. Влияние гидрофизических неоднородностей на измерение обратного объемного рассеяния звука // Тезисы третьей всероссийской НТК "Теория цепей и сигналов" (ТЦиС). – Таганрог: Изд-во ВУЗов, "Электромеханика", г. Новочеркасск, 1996 г. – С. 70-71.

## REFERENCE

1. Kallistratova M.A., Kouznetsov R.D. Low-level jets in the Moscow region in summer and winter observed with a sodar network, *Boundary-layer Meteorology*, 2012, Vol. 143, pp. 159-175.
2. Krasnenko N.P. Prizemnoe rasprostranenie zvukovykh voln v atmosfere [Ground distribution of sound waves to atmosphere], *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk state university of control systems and radio electronics], 2013, No. 2 (28), pp. 86-94.
3. Krasnenko N.P. Metody i sredstva distantsionnogo akusticheskogo zondirovaniya atmosfery [Method and means of remote acoustic sounding of atmosphere], *Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii* [Methods and devices of transfer and information processing], 2009, No. 11, pp. 143-154.
4. Novikov B.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I. Nelineynaya gidroakustika [Nonlinear hydroacoustics]. Leningrad: Sudostroenie, 1981, 264 p.
5. Novikov B.K., Timoshenko V.I. Parametricheskie anteny v gidrolokatsii [Parametrical aerials in a hydrolocation]. Leningrad: Sudostroenie, 1990, 256 p.
6. Grabar' A.G., Zakharov I.S., Timoshenko V.I. Istoriya gidroakustiki [Hydroacoustics history]. Rostov-on-Don: Rosizdat, 2002, 560 p.
7. Kuznetsov V.P., Mordvinov B.G., Timoshenko V.I. Akusticheskie okeanologicheskie issledovaniya i ekspeditsii [Acoustic oceanologic researches and expeditions]. Rostov-on-Don: Rostizdat, 2002, 484 p.
8. Voronin V.A., Kuznetsov V.P., Mordvinov B.G., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. Nelineynye i parametricheskie protsessy v akustike okeana [Nonlinear and parametrical processes in acoustics of ocean]. Rostov-on-Don: Rostizdat, 2007, 448 p.
9. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. Gidroakusticheskie parametricheskie sistemy [Hydroacoustic parametrical systems]. Rostov-on-Don: Rostizdat. 2004, 400 p.
10. Kulichkov S.N. Nelineynaya generatsiya nizkochastotnoy komponenty pri rasprostraneni v atmosfere intensivnoy modulirovannoy zvukovoy volny [Nonlinear generation low-frequency components at distribution to atmosphere of the intensive modulated sound wave], *Fizika atmosfery i okeana* [Physics of atmosphere and ocean], 1979, Vol. 15, No. 4, pp. 384-391.
11. Bodryagin V.I., Dugin V.V. K opredeleniyu optimal'nykh rabochikh chastot i razmerov parametricheskogo izluchatelya [To definition of optimum working frequencies and the sizes of a parametrical radiator], *Vestnik Kievskogo politekhnicheskogo instituta. Elektroakustika i zvukotekhnika* [Bulletin of the Kiev Polytechnic Institute. Electroacoustics and audio engineering], 1987, No. 11, pp. 13-15.
12. Kuznetsov V.P. Uravneniya nelineynoy akustiki [Equations of nonlinear acoustics], *Akusticheskii zhurnal* [Akusticheski Zhurnal], 1970, Vol. 16, No. 4, pp. 548.
13. Naugol'nykh K.A., Rybak S.A., Skrynnikov Yu.I. O nelineynom vzaimodeystvii akusticheskikh voln v neodnorodnom potoke zhidkosti [About nonlinear interaction of acoustic waves in a inhomogeneous stream of a liquid], *Akusticheskii zhurnal* [Akusticheski Zhurnal], 1993, Vol. 39, No. 2, pp. 321-325.



14. *Dmitriev V.G., Naugol'nykh K.A.* Pole parametricheskogo izluchatelya v volnovode s plavnoneodnorodnym potokom zhidkosti [Field of a parametrical radiator in a wave guide with inhomogeneous a liquid stream], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskiy Zhurnal], 1994, Vol. 40, No. 3, pp. 385-389; 1975, Vol. 43, No. 1, pp. 109-116.
15. *Blokhintsev D.I.* Akustika neodnorodnoy dvizhushcheysya sredy [Acoustics of the inhomogeneous moving environment]. Moscow: Nauka, 1981, 206 p.
16. *Voronin V.A., Kirichenko I.A.* O vliyaniy potoka zhidkosti s pul'satsiyami davleniya na pole parametricheskogo izluchatelya [About influence of a stream of a liquid with pulsations of pressure in the field of a parametrical radiator], *Materialy Vserossiyskoy NTK "Meditsinskie informatsionnye sistemy"* [Materials All-Russia Conference "Medical information systems"]. Taganrog: TRTU, 1995, Issue 5 (XII), pp. 29-34.
17. *Voronin V.A., Kirichenko I.A.* Eksperimental'noe issledovanie neodnorodnogo gidrodinamicheskogo potoka na kharakteristiki parametricheskoy anteny [Experimental research of an inhomogeneous hydrodynamic stream on characteristics of the parametrical aerial], *Trudy TRTU: Materialy XLI NTK* [Works TSURE: Materials XLI scientific and technical conference]. Taganrog: TRTU, 1995.
18. *Kirichenko I.A.* K voprosu o vliyaniy neodnorodnostey vodnoy sredy na kharakteristiku napravlenosti parametricheskoy izluchayushchey anteny [To a question on influence inhomogeneous the water environment on the characteristic of an orientation of the parametrical radiating aerial], *Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov i aspirantov "Novye informatsionnye tekhnologii. Informatsionnoe, programnoe i apparatnoe obespechenie"* [Materials of the All-Russia scientific conference of students and post-graduate students "New information technology. Information, program and hardware maintenance"]. Taganrog: TRTU, 1995, pp. 169-170.
19. *Voronin V.A., Kirichenko I.A.* Parametricheskaya antenna dlya ekologicheskikh issledovaniy vodnoy sredy [Parametrical the aerial for ecological researches water], *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii "Fundamental'nye i prikladnye problemy okhrany okruzhayushchey sredy": Tezisy dokladov* [Materials of the International conference "Fundamental and applied problems of preservation of the environment": Reports]. Vol. 1. Tomsk: TGU, 1995, pp. 27-28.
20. *Voronin V.A., Kirichenko I.A.* Parametric array for ecological investigations of water medium, *International Conference POOS-95, September 12-16, 1995*. Tomsk, pp. 62-63.
21. *Voronin V.A., Kirichenko I.A.* Vliyaniye gidrofizicheskikh neodnorodnostey na izmereniye obratnogo ob'emnogo rassyaniya zvuka [Influence hydrophysical inhomogeneous on measurement of return volume sound scattering], *Tezisy tret'ey vserossiyskoy NTK "Teoriya tsepey i signalov" (TTsiS)* [Theses of the third All-Russia Conference "The Theory of chains and signals"]. Taganrog: Izd-vo VUZov, "Elektromekhanika", g. Novocheerkassk, 1996, pp. 70-71.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Б. Есипов.

**Воронин Василий Алексеевич** – Южный федеральный университет; e-mail: vva-47@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

**Воронин Артем Васильевич** – e-mail: vva-47@mail.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; ассистент.

**Снесарев Сергей Стефанович** – e-mail: snesarevs@mail.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; старший преподаватель.

**Voronin Vasily Alekssevich** – Southern federal university; e-mail: vva-47@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of electrohydroacoustic and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

**Voronin Artem Vasilyevich** – e-mail: vva-47@mail.ru; the department of electrohydroacoustic and medical engineering; assistant.

**Snesarev Sergey Stefanovich** – e-mail: snesarevs@mail.ru; the department of electrohydroacoustic and medical engineering; major lecturer.