

Vishnevetsky Vyacheslav Yurevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: vvu@fep.tti.sfedu.ru.

44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371795.

Department of Hydroacoustic and Medical Engineering; Cand. Eng. Sc.; Assistant Professor.

Bulavkova Natalia Gennadievna

E-mail: bulavkova@mail.ru.

The Department of Hydroacoustic and Medical Engineering; Undergraduate.

Ledyeva Valeriya Sergeevna

E-mail: val2269@yandex.ru.

The Department of Hydroacoustic and Medical Engineering; Undergraduate.

УДК 534.222.2

В.Ю. Волощенко

**К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННОЙ НЧ- И ВЧ-КОМПОНЕНТ СПЕКТРА**

Предложено объяснение различной эффективности нелинейной генерации в водной среде низкочастотных и высокочастотных компонент спектра излучения параметрической антенны, сформированной волнами накачки средней интенсивности с гауссовым распределением амплитуд сигналов поперек апертуры взаимодействующих пучков. Для волны суммарной частоты волновой размер длины области формирования сигнала является постоянной величиной. Изменения отношений коэффициентов преобразования по давлению происходят только вследствие появления различий волновых размеров области формирования на разностной частоте и исходных частотах накачки. Это приводит к перераспределению амплитудных соотношений спектральных компонент излучения параметрической антенны.

Нелинейная акустика; излучающая параметрическая антенна.

V.Y. Voloshchenko

**THE PARAMETRIC TRANSMITTING ARRAY: THE EFFICIENCY
EVALUATION OF LF AND HF SIGNAL COMPONENT'S GENERATION**

The paper presents the explanation of various generation efficiency in nonlinear medium of LF and HF spectral components by parametric transmitting array formed on average intensity pump waves with the normal amplitude distribution crosswise aperture. For a wave of total frequency the wave size of length of area of formation of a signal is a constant. Changes of relations of factors of transformation on pressure occur only owing to occurrence of distinctions of the wave sizes of area of formation on разностной frequency and initial frequencies of a rating. It leads to redistribution of peak parities spectral a component of radiation of the parametrical aerial.

Nonlinear acoustics; the transmitting parametric array.

Проектирование и внедрение устройств активной локации с параметрическими антеннами началось в нашей стране [1] в начале 70-х годов прошлого столетия и было обусловлено соответствием пространственных характеристик акустических полей низкочастотных спектральных компонент спектра излучения акустическим и сложным задачам широкополосного «дальнего» эхопоиска объектов на морском шельфе. Использование лишь одной компоненты спектра – волны разно-

стной частоты $F = |f_1 - f_2|$ ($f_{1,2}$) из набора формирующихся в водной среде спектральных составляющих излучения ($nf_1, nf_2, f_+ = f_1 + f_2$, $n=1,2,3,4, \dots$) для получения информации, отражающей наличие, свойства и характеристики подводных объектов, является «энергетически расточительным», причем до настоящего времени эффективность генерации низкочастотных и высокочастотных компонент спектра излучения в водной среде не сопоставлялась [2].

Эффективность нелинейной генерации рассматриваемых сигналов можно оценить с помощью амплитудных (энергетических) коэффициентов преобразования по давлению $\eta_{P\pm}, \eta_P$ ($2f_{1,2}$) (интенсивности $\eta_{I\pm}, \eta_I$ ($2f_{1,2}$)) для соответствующих удалений от преобразователя накачки, т.е. расчетных пространственных зависимостей отношений амплитуд звуковых давлений (второй степени отношений амплитуд) сформированной в среде спектральной компоненты и исходного сигнала накачки на акустической оси излучающей параметрической антенны, сформированной волнами накачки средней интенсивности с гауссовым распределением амплитуд сигналов поперек апертуры взаимодействующих пучков.

В данном случае для осевых распределений амплитуд звуковых давлений акустических сигналов, сформированных в области взаимодействия параметрической антенны, справедливы аналитические выражения:

- ♦ для сигнала накачки с центральной частотой $f_0 = (f_1 + f_2)/2$ [1]:

$$P_{(f_0)}(Z_H, 0) = (p_0 / \sqrt{1 + Z_H^2}) \cdot \exp(-\alpha_0 z), \quad (1)$$

- ♦ для сигнала разностной частоты $F = |f_1 - f_2|$ [1]:

$$P_{-}(Z_H, 0) = \frac{\varepsilon \Omega \cdot p_{01} p_{02} \cdot L_D}{2 \rho_0 c_0^3} \cdot \sqrt{\frac{\ln^2[(\frac{L_D}{l_D}) Z_H] + \operatorname{arctg}^2[(\frac{L_D}{l_D}) Z_H]}{1 + (\frac{L_D}{l_D})^2 \cdot Z_H^2}} \exp(-\alpha_{-} z), \quad (2)$$

- ♦ для сигнала суммарной частоты $f_+ = f_1 + f_2$ [2]:

$$P_{+}(Z_H, 0) = \frac{\varepsilon \omega_{+} \cdot p_{01} p_{02} \cdot l_D}{2 \rho_0 c_0^3} \cdot \sqrt{\frac{0,25 \ln^2(1 + Z_H^2) + \operatorname{arctg}^2 Z_H}{1 + Z_H^2}} \cdot \exp(-\alpha_{+} z), \quad (3)$$

где p_0, p_{01}, p_{02} – амплитуды звукового давления волн накачки с циклическими частотами $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$, $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$, $\omega_2 = 2\pi \cdot f_2$ у центральной части излучающей поверхности электроакустического преобразователя; $Z_H = z/l_D = z/l_{D+}$ – продольная нормированная координата на акустической оси пучка; z – продольная координата, направленная вдоль распространения волны; ε, c_0, ρ_0 – нелинейный параметр, скорость звука и равновесное значение плотности в воде; $l_D = a^2 \omega_0 / 2c_0$, $l_{D1,2} = k_{1,2} a^2 / 2$, $l_{D+} = a^2 \omega_{+} / 4c_0 = (l_{D1} + l_{D2}) / 2 \approx l_D$, $L_D = a^2 \Omega / 4c_0$, $\Omega = 2\pi \cdot F = 2\pi(f_2 - f_1)$ – расстояния областей дифракции Френеля электроакустического преобразователя для центральной и соответствующих волн накачки; волн суммарной и разностной частот; a – радиус пучка; $\alpha_{1,2}, \alpha_0$ – коэффициенты затухания волн накачки с циклическими

частотами $\omega_{1,2}$ и центральной циклической частотой ω_0 волн накачки; α_- , α_+ – коэффициенты затухания волн разностной и суммарной частот.

Будем считать, что $p_{01} = p_{02} = p_0$, $\omega_1 < \omega_2$ и запишем искомые отношения

$$\eta_{P+} = \frac{P_+(Z_H, 0)}{P_{(f_0)}(Z_H, 0)} = \frac{\varepsilon \omega_+ p_0 \cdot l_D}{2 \rho_0 c_0^3} \cdot \sqrt{0,25 \ln^2(1 + Z_H^2) + \operatorname{arctg}^2 Z_H} \cdot \exp[-(\alpha_+ - \alpha_0)z], \quad (4)$$

$$\eta_{P-} = \frac{P_-(Z_H, 0)}{P_{(f_0)}(Z_H, 0)} = \frac{\varepsilon \Omega \cdot p_0 L_D}{2 \rho_0 c_0^3} \sqrt{\frac{\ln^2(\frac{L_D}{l_D}) Z_H + \operatorname{arctg}^2(\frac{L_D}{l_D}) Z_H}{\{1 + [\frac{L_D}{l_D} Z_H]^2\} \cdot (1 + Z_H^2)^{-1}}} \exp[-(\alpha_- - \alpha_0)z]. \quad (5)$$

Симметричное изменение частот исходных волн f_1 (уменьшение) и f_2 (увеличение) относительно центральной резонансной частоты $f_0 = (f_1 + f_2)/2 = f_+/2$ электроакустического преобразователя накачки параметрической антенны в пределах его полосы пропускания обусловит изменение величин длин дифракции исходных волн конечной амплитуды с частотами f_1, f_2 ($f_1 < f_2$), причем постоянной останется только длина ближней зоны для волны суммарной частоты $l_{D+} = a^2 \omega_+ / 4c_0 = (l_{D1} + l_{D2})/2 \approx l_D$. Каждое соотношение (4) и (5) содержит три сомножителя, первые из которых определяются параметрами акустического поля накачки и среды распространения, вторые – дифракционными процессами, определяющими осевые распределения амплитуд звуковых давлений компонент спектра излучения параметрической антенны, последние – затуханием сигналов. Используя соотношения для волновых чисел акустических сигналов суммарной и разностной частот $K_+ = \omega_+ / c_0 = 2\pi/\lambda_+$ и $K_- = \Omega / c_0 = 2\pi/\Lambda$, а также связь $L_D = (\Omega/2\omega_0) \cdot l_D$, представим первые сомножители в следующем виде:

$$\frac{\varepsilon \cdot \omega_+ \cdot p_0 \cdot l_D}{2 \cdot \rho_0 \cdot c_0^3} = \frac{\varepsilon \cdot p_0 \cdot \pi}{\rho_0 c_0^2} \times \frac{l_D}{\lambda_+}, \quad \frac{\varepsilon \cdot \Omega \cdot p_0 \cdot L_D}{2 \cdot \rho_0 \cdot c_0^3} = \frac{\varepsilon \cdot p_0 \pi}{\rho_0 c_0^2} \times \frac{L_D}{\Lambda} = \frac{\varepsilon \cdot p_0 \cdot \pi}{\rho_0 c_0^2} \times \frac{\Omega}{\omega_+} \times \frac{l_D}{\Lambda}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что эффективность нелинейной генерации компонент спектра излучения параметрической антенны определяется количеством длин волн соответствующих волновых процессов, укладывающихся на длине дифракции волны накачки с центральной циклической частотой ω_0 , т.е. количеством вторичных виртуальных источников, генерирующих соответствующую спектральную компоненту в общем водном объеме соосных акустических пучков средней интенсивности.

Вторые и третьи сомножители в (4) и (5) определяют зависимости величин амплитудных коэффициентов преобразования по давлению η_{P+} , η_{P-} для волн суммарной и разностной частот при изменении нормированной продольной координаты Z_H на акустической оси параметрической антенны, причем если для волны суммарной частоты с увеличением Z_H график, отражающий изменение значений коэффициента преобразования по давлению η_{P+} , достигает максимума на определенном удалении, а затем экспоненциально убывает, то для волны разностной частоты характерна монотонная положительная динамика приращения значений коэффициента преобразования по давлению η_{P-} , что обусловлено как ди-

фракционными эффектами (второй сомножитель), так и затуханием накачки (третий сомножитель – экспонента с положительной степенью для волны накачки). Учитывая, что $(L_D/l_D) = (F/f_+) = (\lambda_+/\Lambda)$, запишем отношение амплитудных коэффициентов преобразования по давлению (4) и (5) в следующем виде:

$$\frac{\eta_{p+}}{\eta_{p-}} = \left(\frac{\Lambda}{\lambda_+}\right)^2 \sqrt{\frac{[0,25 \ln^2(1 + Z_H^2) + \arctg^2 Z_H] \cdot [1 + ((\frac{\lambda_+}{\Lambda})^2 Z_H^2)]}{(1 + Z_H^2) \cdot [\ln^2(\frac{\lambda_+}{\Lambda}) Z_H + \arctg^2(\frac{\lambda_+}{\Lambda}) Z_H]}} \exp[-(\alpha_+ - \alpha_-)z]}. \quad (7)$$

Из (7) видно, что именно данный параметр – соотношение длин волн формирующихся компонент спектра излучения и длины «прожекторной зоны» преобразователя накачки параметрической антенны – определяет существенность различий в эффективности нелинейной генерации данных сигналов.

Предположим, что для решения задачи горизонтального эхопоиска объектов на дистанциях до 100 м в приповерхностном аэрированном слое внутреннего водоема используется гидроакустическая аппаратура с режимом параметрического излучения с центральной частотой накачки $f_0 = 250$ кГц, электроакустический преобразователь диаметром 0,1 м и длиной ближней зоны для волн накачки 1,1 м соответственно. Как установлено в результате экспериментальных исследований, существует оптимальное соотношение дифракционных процессов для волн накачки с частотами $f_1, f_2 (f_1 < f_2)$ и разностной частоты $F = |f_2 - f_1|$, определяемое соотношением их частот или длин волн: $f_0/F = \Lambda/\lambda_0 = (3 \div 5)$ [1]. В данном случае с учетом того, что $f_+ = 2f_0$, аналогичное соотношение дифракционных процессов для волн разностной и суммарной частот будет следующим: $f_+/F = \Lambda/\lambda_+ = (6 \div 10)$. В расчете будем использовать отмеченные выше оптимальные соотношения дифракционных процессов для спектральных компонент излучения параметрической антенны в водной среде, что при симметричном изменении частот исходных волн f_1 (уменьшение) и f_2 (увеличение) относительно центральной резонансной частоты $f_0 = (f_1 + f_2)/2 = f_+/2 = 250$ кГц электроакустического преобразователя накачки (или двухчастотного электроакустического преобразователя мозаичной конструкции) обеспечит широкополосность излучения:

1) $f_0/F_1 = \Lambda/\lambda_0 = 5$: $F_1 = 50$, $f_1 = 225$, $f_2 = 275$; $2f_1 = 450$; $f_+ = 500$; $2f_2 = 550$ (кГц);

2) $f_0/F_2 = \Lambda/\lambda_0 = 4$: $F_2 = 62,5$; $f_1 = 218,75$; $f_2 = 281,25$; $2f_1 = 437,5$; $f_+ = 500$; $2f_2 = 562,5$ (кГц);

3) $f_0/F_3 = \Lambda/\lambda_0 = 3$: $F_3 = 85$; $f_1 = 207,5$; $f_2 = 292,5$; $2f_1 = 415$; $f_+ = 500$; $2f_2 = 585$ (кГц).

Следует отметить, что сформированные спектральные компоненты – волны разностной и суммарной частот, вторые гармоники волн накачки – начинают сферическое расхождение на различных удалениях от преобразователя накачки, в частности, в направлении акустической оси для волны разностной частоты протяженность области формирования составляет $f_0 \cdot l_D / F$, в то время как волновые фронты сигналов суммарной частоты и вторых гармоник волн накачки можно считать сферическими уже с расстояний $z \geq l_D$.

Расчет затухания ультразвука производился для пресной воды с загрязнением в соответствии с соотношением [3]: $\alpha = K \times f^{1,5}$, где α – в Нп/м; f – в Гц, $K = 0,2765 \times 10^{-10}$ (для речных условий вследствие аэрации приповерхностного слоя мелководья для высокочастотных компонент излучения параметрической антенны

величина коэффициента k увеличена в 1,8 раза). Расчетные значения коэффициентов затухания составили: для сигнала суммарной частоты – $\alpha_+ = 0,0176$ Нп/м; для сигнала накачки с центральной частотой $f_0 = 250$ кГц – $\alpha_0 = 0,00622$ Нп/м; для сигнала разностной частоты – $\alpha_- = 0,00056$ Нп/м.

Пространственная эффективность генерации рабочих сигналов для эхопоиска – компонент спектра излучения параметрической антенны суммарной и разностной частот (рис. 1, —), вторых гармоник бигармонической накачки (рис. 1, - - -) рассматривалась для трех указанных случаев соотношений дифракционных процессов в соответствии с (7) и (8).

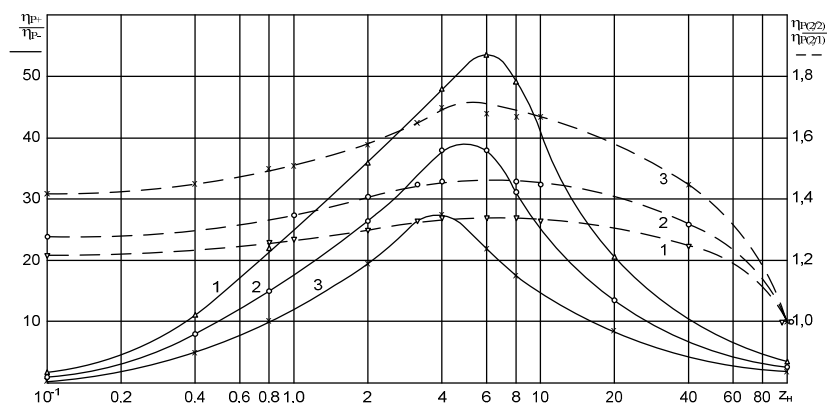


Рис. 1. Расчетные зависимости отношений коэффициентов преобразования по давлению η_{p+}/η_{p-} { —, $f_+ = 500$ кГц, $F_1 = 50$ кГц (1, $\Lambda/\lambda_+ = 10$), $F_2 = 62,5$ кГц (2, $\Lambda/\lambda_+ = 8$), $F_3 = 85$ кГц (3, $\Lambda/\lambda_+ = 6$) } и $\eta_{p(2f_2)}/\eta_{p(2f_1)}$ { - - -, 1, $2f_1 = 450$ кГц, $2f_2 = 550$ кГц, ($F_1 = 50$ кГц); 2, $2f_1 = 437,5$ кГц, $2f_2 = 562,5$ кГц, ($F_2 = 62,5$ кГц); 3, $2f_1 = 415$ кГц, $2f_2 = 585$ кГц, ($F_3 = 85$ кГц) } на акустической оси параметрической антенны

Из графиков η_{p+}/η_{p-} { —, $f_+ = 500$ кГц, $F_1 = 50$ кГц (1, $\Lambda/\lambda_+ = 10$), $F_2 = 62,5$ кГц (2, $\Lambda/\lambda_+ = 8$), $F_3 = 85$ кГц (3, $\Lambda/\lambda_+ = 6$) } видно, что по мере удаления от преобразователя накачки на его акустической оси все три зависимости следуют общей закономерности:

1) начальные участки зависимостей обладают положительной динамикой, крутизна нарастания которых различна: наибольшая – для наименьшей разностной частоты (1, 50 кГц), а наименьшая – для наибольшей разностной частоты (3, 85 кГц);

2) зависимости имеют достаточно «острые» максимумы, для которых как амплитуда, так и ширина по некоторому заданному уровню, а также их удаления от источника увеличиваются с уменьшением частоты разностного сигнала, в частности, величины максимумов зависимостей отношений коэффициентов преобразования по давлению и их расположение на акустической оси параметрической антенны составляют соответственно: 54 и $6 \cdot l_d$ (1, $F = 50$ кГц), 40 и $5 \cdot l_d$ (2, $F = 62,5$ кГц), 27 и $4 \cdot l_d$ (3, $F = 85$ кГц);

3) после максимумов зависимости имеют отрицательную динамику, крутизна спада которых: наибольшая – для наименьшей разностной частоты (1, 50 кГц), а наименьшая – для наибольшей разностной частоты (3, 85 кГц);

При анализе кривых η_{P+}/η_{P-} {—, $f_+ = 500$ кГц, $F_1 = 50$ кГц (1, $\Lambda/\lambda_+ = 10$), $F_2 = 62,5$ кГц (2, $\Lambda/\lambda_+ = 8$), $F_3 = 85$ кГц (3, $\Lambda/\lambda_+ = 6$)} на рис.1 следует учитывать следующее: наименьшей разностной частоте ($F_1 = 50$ кГц) соответствует наибольшая длина волны $\Lambda_1 = c_0/F_1 = 30$ мм, а наибольшей разностной частоте

($F_3 = 85$ кГц) соответствует наименьшая длина волны $\Lambda_3 = c_0/F_3 = 17,64$ мм, что обуславливает как различное число длин волн сигналов разностной частоты, укладываемых на длине области формирования данного сигнала, так и соответственно разную эффективность генерации низкочастотной спектральной компоненты. В то же время для волны суммарной частоты волновой размер длины области формирования сигнала является постоянной величиной и изменения отношений коэффициентов преобразования по давлению, описываемые графиками 1, 2, 3, происходят только вследствие появления различий волновых размеров области формирования на разностной частоте и исходных частотах накачки, что приводит к перераспределению амплитудных соотношений спектральных компонент излучения параметрической антенны. Очевидно, что расчетные зависимости отношений коэффициентов преобразования $\eta_{P(2f_1)}/\eta_{P-}$ и $\eta_{P(2f_2)}/\eta_{P-}$ по давлению на акустической оси параметрической антенны для сигналов вторых гармоник $2f_1$, $2f_2$ и волн разностных частот $F_1 = 50$ кГц, $F_2 = 62,5$ кГц, $F_3 = 85$ кГц будут аналогичны представленным на рис. 1.

Для анализа эффективности генерации параметрической антенной еще двух высокочастотных компонент спектра излучения – ультразвуковых сигналов вторых гармоник бигармонической накачки – следует рассмотреть динамику изменения зависимости отношений их коэффициентов преобразования по давлению

$\eta_{P(2f_2)}/\eta_{P(2f_1)}$ на акустической оси

$$\frac{\eta_{P(2f_2)}}{\eta_{P(2f_1)}} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^2 \sqrt{\frac{[0,25 \ln^2(1 + Z_{H2}^2) + \arctg^2 Z_{H2}]}{[0,25 \ln^2(1 + Z_{H1}^2) + \arctg^2 Z_{H1}]}} \exp\{ -[(\alpha_{(2f_2)} - \alpha_2) + (\alpha_{(2f_1)} - \alpha_1)]z \}, \quad (8)$$

где $Z_{H1,2} = z/l_{д1,2}$ – продольная нормированная координата на акустической оси пучка, $\alpha_{(2f_2)}$, $\alpha_{(2f_1)}$ – коэффициенты затухания сигналов вторых гармоник бигармонической накачки.

Из графиков $\eta_{P(2f_2)}/\eta_{P(2f_1)}$ {---, 1, $2f_1 = 450$ кГц, $2f_2 = 550$ кГц, ($F_1 = 50$ кГц); 2, $2f_1 = 437,5$ кГц, $2f_2 = 562,5$ кГц, ($F_2 = 62,5$ кГц); 3, $2f_1 = 415$ кГц, $2f_2 = 585$ кГц, ($F_3 = 85$ кГц)} видно, что по мере удаления от преобразователя накачки на его акустической оси все три зависимости следуют общей закономерности:

1) начальные участки зависимостей обладают положительной динамикой, крутизна нарастания которых различна: наибольшая – для случая наибольшего различия длин ближних зон, волновые размеры которых по сигналам накачки наиболее сильно отличаются (3), а наименьшая – при наименьшем отличии волновых размеров ближних зон (1);

2) зависимости имеют достаточно «пологие» максимумы, для которых амплитуда и ширина по некоторому заданному уровню имеют «разнонаправленную»

динамику изменений: уменьшению амплитуды соответствует «расплывание» максимума вдоль акустической оси. Так, кривой 3 соответствует максимум наибольшей амплитуды ($\approx 1,7$), пространственная протяженность которого по уровню 0,7 вдоль акустической оси заключена в пределах $\approx (3 \div 18) \cdot Z_H$, в то время как кривой 1 соответствует максимум наименьшей амплитуды ($\approx 1,36$), пространственная протяженность которого по уровню 0,7 $\approx (2 \div 24) \cdot Z_H$;

3) после максимумов зависимости имеют отрицательную динамику, крутизна спада которых различна, так как определяется затуханием как высокочастотных спектральных компонент, так и волн накачки: наибольшая – для сильно отличающихся по частоте волн накачки (3), а наименьшая – для волн накачки более близких частот (1), причем для кривых характерно «слияние» при увеличении значений нормированной продольной координаты Z_H .

Подчеркнем еще раз, что каждая кривая 1, 2, 3 на рис. 1 имеет особенности, причиной которых является симметричное изменение волновых размеров областей формирования высокочастотных компонент (изменение числа длин λ_1 и λ_2 волн накачки, укладываемых на длинах ближних зон дифракции Френеля $l_{Д1}$ и $l_{Д2}$: уменьшение для f_1 и увеличение для f_2 соответственно).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гидроакустическая энциклопедия / Под общ. ред. В.И.Тимошенко. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 788 с.
2. Волощенко В.Ю., Тимошенко В.И. Параметрические гидроакустические средства ближнего подводного наблюдения (Ч. 1). – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009.
3. Яковлев А. Н., Каблов Г.П. Гидролокаторы ближнего действия. – Л.: Судостроение, 1983. – 200 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.И. Жорник.

Волощенко Вадим Юрьевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: Vigcorp@mail.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371794.

Кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; к.т.н.; доцент.

Voloshchenko Vadim Yur'evich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: Vigcorp@mail.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371794.

The Department of Engineering Drawing and Computer Design; Cand. of Eng. Sc.; Associate Professor.