

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ

УДК 534.612+551.463.288  
EDN: QRLJVS

В.А. Калью<sup>1</sup>, Н.В. Краснописцев<sup>2</sup>, Г.И. Лосев<sup>2</sup>, В.Н. Некрасов<sup>2</sup>,  
В.В. Петрова<sup>1</sup>, Д.А. Смирнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»,  
Московская область, Россия

## ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЕЙ ПОДВОДНОГО ШУМА ИСТОЧНИКА В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ ПРЯМЫМ МЕТОДОМ И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНО-ФАЗОВОЙ ОБРАБОТКИ

**Объект и цель научной работы.** Оценки уровня подводного шума движущегося широкополосного источника, получаемые прямым и косвенным методами, с использованием комбинированного приемника звукового давления и компонент вектора колебательной скорости.

**Материалы и методы.** Натурные эксперименты в реальных условиях измерения, статистический анализ результатов экспериментов.

**Основные результаты.** По представительным выборкам выполнено сравнение оценок уровня шума в области высоких частот, получаемых прямым методом, только по каналу звукового давления, и косвенным методом, путем пересчета значений потока акустической мощности в идеальных условиях и в условиях реальной акватории.

**Закключение.** В условиях шумозаглушенного бассейна оценки уровней подводного шума источника в диапазоне частот от 1 до 10 кГц, получаемые как усреднением квадрата акустического давления, так и усреднением плотности потока акустической мощности, не различаются на фоне погрешности калибровки канала колебательной скорости. При измерениях уровней подводного шума источника в условиях реальной акватории использование усредненной по времени плотности потока акустической мощности дает более точную оценку, значимо отличающуюся в меньшую сторону от результатов непосредственного измерения среднего по времени квадрата акустического давления.

**Ключевые слова:** звуковое давление, колебательная скорость, векторный приемник, плотность потока акустической мощности, уровень подводного шума.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

## SHIP SIGNATURES

UDC 534.612+551.463.288  
EDN: QRLJVS

V.A. Kalyu<sup>1</sup>, N.V. Krasnopistsev<sup>2</sup>, G.I. Losev<sup>2</sup>, V.N. Nekrasov<sup>2</sup>, V.V. Petrova<sup>1</sup>, D.A. Smirnov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering” (VNIIFTRI),  
Moscow Region, Russia

## MEASUREMENT OF UNDERWATER-RADIATED NOISE LEVELS AT SOURCE BY DIRECT METHOD AND USING VECTOR/PHASE PROCESSING

*Для цитирования:* Калью В.А., Краснописцев Н.В., Лосев Г.И., Некрасов В.Н., Петрова В.В., Смирнов Д.А. Измерение уровней подводного шума источника в области высоких частот прямым методом и с использованием векторно-фазовой обработки. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 2(408): 107–115.

*For citations:* Kalyu V.A., Krasnopistsev N.V., Losev G.I., Nekrasov V.N., Petrova V.V., Smirnov D.A. Measurement of underwater-radiated noise levels at source by direct method and using vector/phase processing. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 2(408): 107–115 (in Russian).

**Object and purpose of research.** Moving broadband source underwater noise level estimations obtained by direct and indirect methods using a receiver for the measurement of sound pressure and sound particle velocity components combined. **Materials and methods.** Full-scale experiments in real measurement conditions, statistical analysis of experimental results.

**Main results.** The noise level estimations obtained in the high frequency range by the direct method, only through the sound pressure channel, and by the indirect method with recalculating the values of sound intensity were compared based on representative samples under ideal conditions and in real water area conditions.

**Conclusion.** Under the conditions of a noise-attenuated pool, estimates of the levels of underwater noise of the source in the frequency range 1÷10 kHz, obtained both by averaging the square of the acoustic pressure and by averaging the acoustic power flux density, do not differ against the background of the calibration error of the vibrational velocity channel. When measuring the levels of underwater noise from a source in real water conditions, the use of time-averaged acoustic power flux density gives a more accurate estimate, significantly different from the results of direct measurements of the time-averaged squared acoustic pressure.

**Keywords:** sound pressure, sound particle velocity, vector sensor, sound intensity, underwater noise level.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Комбинированный приемник [1–3], сочетающий гидрофон и приемник колебательной скорости частиц среды  $\vec{V}(\vec{r}, t)$ , позволяет измерять уровни подводного шума (УПШ) как непосредственно через измерение звукового давления  $P(\vec{r}, t)$ , так и с помощью усредненной за время  $t$  плотности потока акустической мощности, описываемой вектором

$$\vec{\Pi}(\vec{r}, t) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} P(\vec{r}, t) \vec{V}(\vec{r}, t) dt, \quad (1)$$

компоненты которого позволяют выделять мощность акустической волны, приходящей в точку приема с выбранного направления.

Ранее в статье [4] была рассмотрена задача сравнения результатов оценивания уровней звукового давления  $L$  движущегося источника шума в области низких частот (от 10 Гц до 1 кГц) в 1/3-октавных полосах частот (со средними частотами  $f_{1/3}$ ) в условиях ограниченной акватории и фоновых шумов с помощью комбинированного приемника и с использованием двух алгоритмов обработки измерительной информации.

Первый алгоритм реализует прямой метод измерения уровня звукового давления

$$L_P(f_{1/3}) = 10 \lg \left( \left( \max_t \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} P^2(t, f_{1/3}) dt \right) / P_0^2 \right), \quad (2)$$

где  $P_0$  – пороговое значение акустического давления  $2 \cdot 10^{-5}$  Па.

Второй алгоритм реализует косвенный метод с использованием измерения плотности потока акустической мощности

$$L_{\Pi}(f_{1/3}) = 10 \lg \left( \left( \max_t \frac{k}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} \Pi_{\alpha}(t, f_{1/3}) dt \right) / P_0^2 \right), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – направление из точки расположения комбинированного приемника перпендикулярно траектории движения источника;  $k$  – калибровочный коэффициент, учитывающий также чувствительность каналов комбинированного приемника.

В настоящей работе анализируются результаты измерений в высокочастотном диапазоне, проведенных с помощью модернизированной приемной системы, которая позволяет получать значения УПШ на частотах вплоть до 10 кГц.

## Формулировка задачи

### Problem formulation

Задача представленного в настоящей статье исследования состоит в сравнении результатов измерений уровней подводного шума движущегося источника в области высоких частот (от 1 до 10 кГц), полученных прямым методом измерения уровней звукового давления и косвенным методом с использованием измерения плотности потока акустической мощности и векторно-фазовой обработки.

Исходя из поставленной задачи сигналы на выходе приемной системы обрабатывались по двум алгоритмам:  $\overline{P^2}$  – непосредственное измерение значения среднего квадрата акустического давления  $\overline{PP^*}$  и  $\overline{\Pi_i}$  – вычисление значения среднего квадрата

акустического давления по измеренной компоненте потока акустической мощности  $\overline{Re PV_i^*}$ .

Для обоих алгоритмов проанализированы результаты измерений как в условиях гидроакустического бассейна, шумозаглушенного на частотах выше 1 кГц, так и в натуральных условиях открытой акватории.

### Эксперимент по измерению уровней подводного шума движущегося объекта в условиях шумозаглушенного гидроакустического бассейна

Experiment to determine the levels of underwater noise of a moving object in a noise-attenuated hydroacoustic pool

При измерениях в бассейне, принимая во внимание его ограниченные размеры, в качестве источника подводного шума использована радиоуправляемая модель, двигавшаяся равномерно относительно пары приемных модулей (ПМ № 1 и ПМ № 2), как показано на рис. 1.

Результаты измерений приводились к единой дистанции 50 м по сферическому закону внесением поправки  $\Delta$ :

$$\Delta = 20 \cdot \lg \frac{d_{Tp}}{50}. \quad (4)$$

При анализе данных рассмотрено  $N_1 = 8$  зачетных реализаций на ПМ № 1 и  $N_2 = 8$  зачетных реализаций на ПМ № 2. Таким образом, общее число реализаций, взятых в зачет по результату эксперимента, составило  $N = N_1 + N_2 = 16$ .

На рис. 2 и 3 представлены усредненные по зачетным галсам значения УПШ на фоне помехи, полученные в диапазоне частот от 1 до 10 кГц различными методами на ПМ № 1 и ПМ № 2 соответственно.

Максимальное различие между средними значениями УПШ, полученными в бассейне различными методами в рассмотренном диапазоне частот составило  $\Delta L = 2,2$  дБ, где

$$\Delta L = \max | \overline{P^2} - \overline{P} |. \quad (5)$$

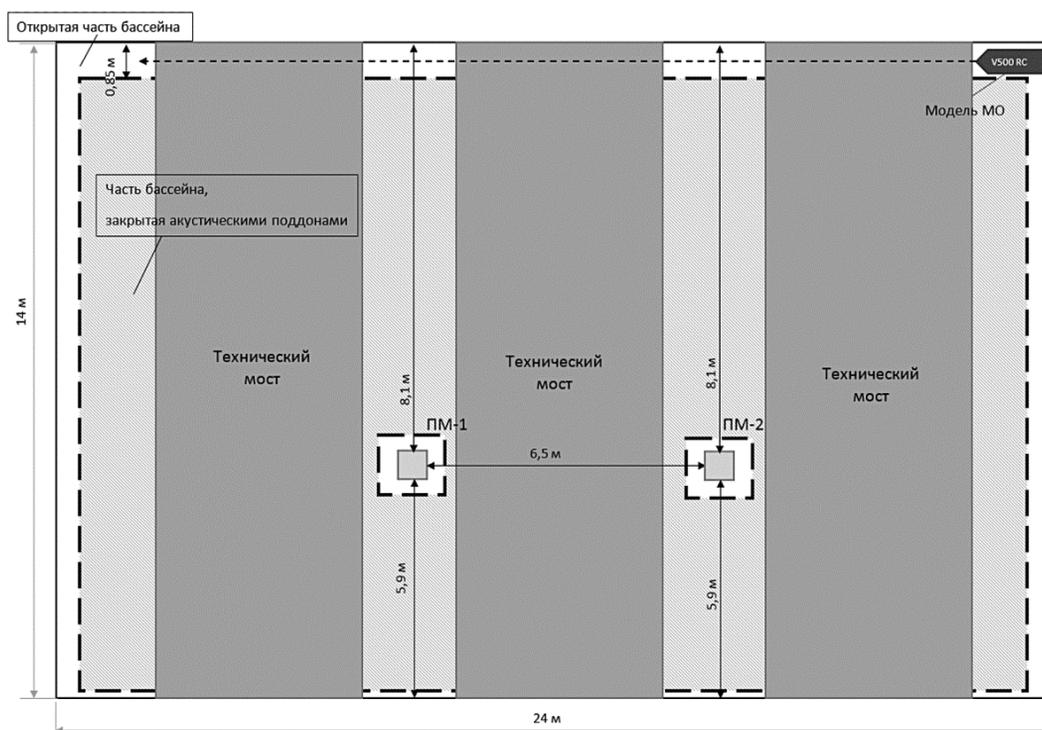
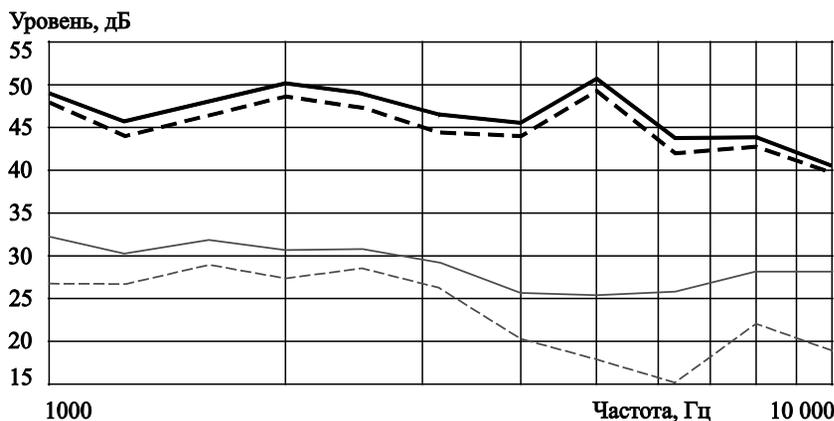


Рис. 1. Схема измерений в условиях гидроакустического бассейна

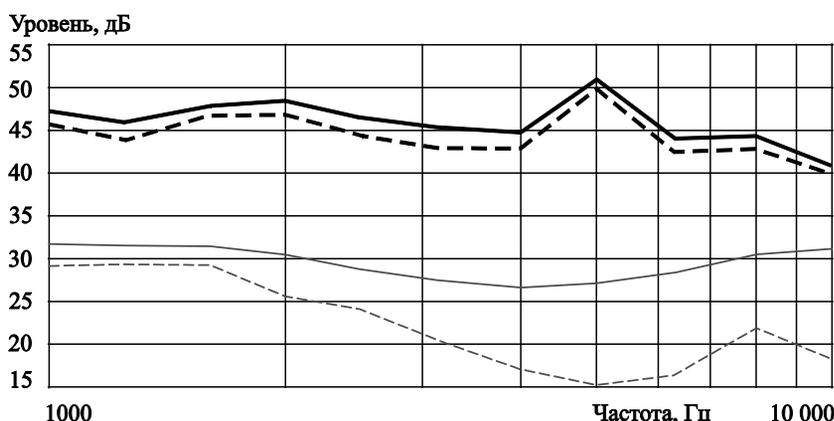
Fig. 1. Measurement scheme in the hydroacoustic pool



**Рис. 2.** Усредненные значения УПШ на фоне помехи, полученные различными методами на ПМ № 1; модель в бассейне

**Fig. 2.** Averaged values of underwater noise levels against the background noise obtained by various methods at receiver No. 1; model in the hydroacoustic pool

— УПШ (метод P2)  
 - - - УПШ (метод П)  
 — Фон (метод P2)  
 - - - Фон (метод П)



**Рис. 3.** Усредненные значения УПШ на фоне помехи, полученные различными методами на ПМ № 2; модель в бассейне

**Fig. 3.** Averaged values of underwater noise levels against the background noise obtained by various methods at receiver No. 2; model in the hydroacoustic pool

— УПШ (метод P2)  
 - - - УПШ (метод П)  
 — Фон (метод P2)  
 - - - Фон (метод П)

## Эксперимент по измерению уровней подводного шума движущегося объекта в натуральных условиях на открытой акватории

Experiment to determine underwater noise levels of a moving object under natural conditions in open waters

Натурный эксперимент проводился в бухте с глубинами от 20 до 70 м и состоял в измерении уровня подводного шума (УПШ) движущегося катера с помощью двух заглубленных приемных модулей (ПМ № 1 и ПМ № 2), оснащенных гидрофонами и приемниками колебательной скорости. Катер совершал равномерное прямолинейное движение с заданной скоростью относительно двух приемных модулей. Траверсная дистанция между катером и приемниками ( $d_{\text{тр}}$ ) лежала в пределах от 43 до 65 м. Результаты измерений приводились к единой дистанции 50 м внесением поправки  $\Delta$  (формула 4).

На рис. 4 и 5 представлены усредненные по зачетным галсам значения УПШ на фоне помехи,

полученные в диапазоне частот от 1 до 10 кГц различными методами на ПМ № 1 и ПМ № 2 соответственно.

При анализе данных рассмотрено  $N_1 = 12$  зачетных реализаций на ПМ № 1 и  $N_2 = 12$  зачетных реализаций на ПМ № 2. Данные, полученные с разных модулей, не усреднялись между собой, поскольку ПМ № 1 и ПМ № 2 не находились в идентичных условиях: различались траверзные дистанции на галсах, глубина постановки модулей и уровни помех на них (рис. 4 и 5).

Максимальное различие между средними значениями УПШ, полученными в условиях открытой акватории различными методами в рассмотренном диапазоне частот, составило  $\Delta L = 5,7$  дБ.

## Анализ результатов исследования

Study results analysis

При статистическом анализе результатов исследования вычислены дисперсии ( $D$ ) выборочных значений

УПШ, полученных по алгоритму  $\overline{P^2}$  и алгоритму  $\overline{\Pi}_i$ , в соответствии со следующими формулами:

$$D_{P^2} = \frac{1}{N_1 + N_2 - 2} \times \left[ \sum_{i=1}^{N_1} (P_{(1)i}^2 - \overline{P_{(1)}^2})^2 + \sum_{j=1}^{N_2} (P_{(2)j}^2 - \overline{P_{(2)}^2})^2 \right], \quad (6)$$

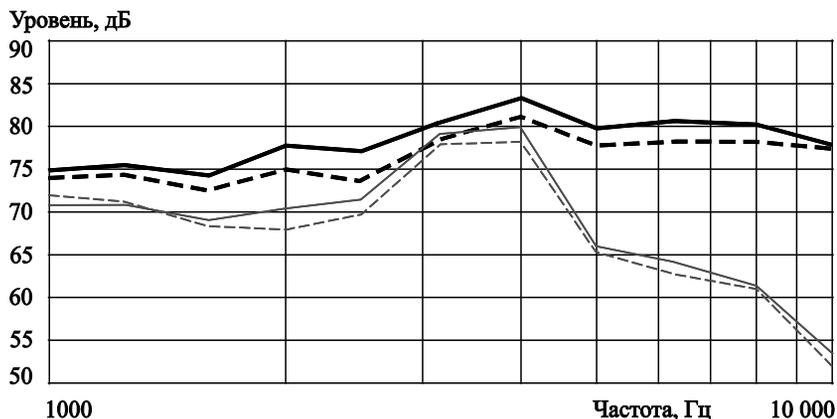
$$D_{\Pi} = \frac{1}{N_1 + N_2 - 2} \times \left[ \sum_{i=1}^{N_1} (\Pi_{(1)i} - \overline{\Pi_{(1)}})^2 + \sum_{j=1}^{N_2} (\Pi_{(2)j} - \overline{\Pi_{(2)}})^2 \right]. \quad (7)$$

На рис. 6 представлено отношение дисперсий для данных, полученных в бассейне, и кри-

**Рис. 4.** Усредненные значения УПШ на фоне помехи, полученные различными методами на ПМ № 1; катер на открытой акватории

**Fig. 4.** Averaged values of underwater noise levels against the background noise obtained by various methods at receiver No. 1; boat in open waters

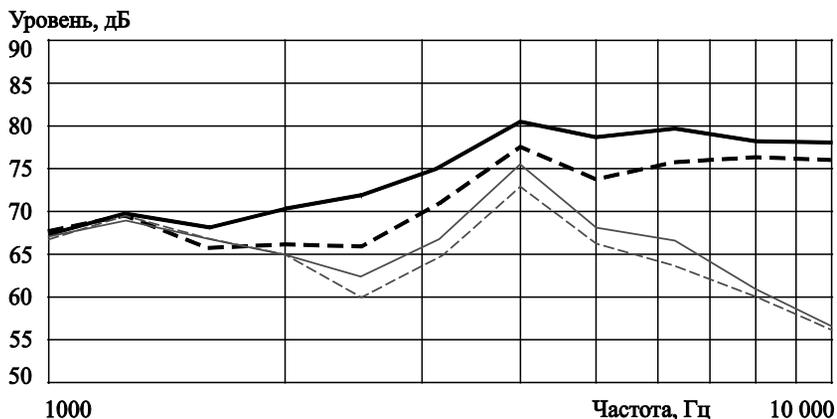
- УПШ (метод P2)
- - - УПШ (метод П)
- Фон (метод P2)
- - - Фон (метод П)



**Рис. 5.** Усредненные значения УПШ на фоне помехи, полученные различными методами на ПМ № 2; катер на открытой акватории

**Fig. 5.** Averaged values of underwater noise levels against the background noise obtained by various methods at receiver No. 2; boat in open waters

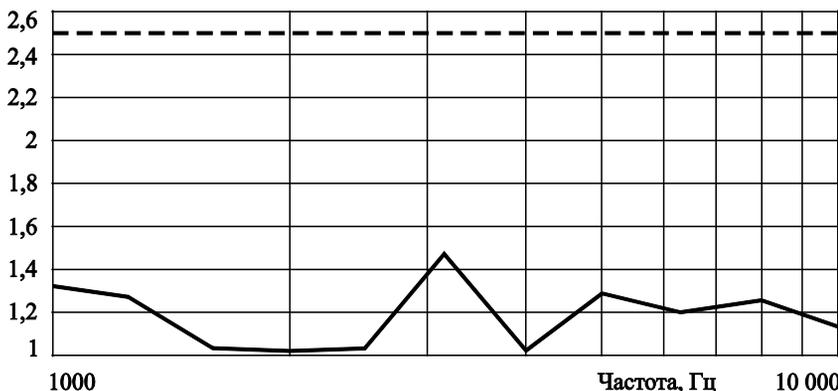
- УПШ (метод P2)
- - - УПШ (метод П)
- Фон (метод P2)
- - - Фон (метод П)



**Рис. 6.** Отношение дисперсий и критическое значение критерия Фишера  $F_{кр} (14, 14, 0,05) = 2,5$ ; модель в гидроакустическом бассейне

**Fig. 6.** The variance ratio and the critical value of the Fisher criterion  $F_{кр} (14, 14, 0,05) = 2,5$ ; model in the hydroacoustic pool

- отношение дисперсий
- - -  $F_{кр}$



тическое значение критерия Фишера, равное  $F_{кр}(14, 14, 0,05) = 2,5$ .

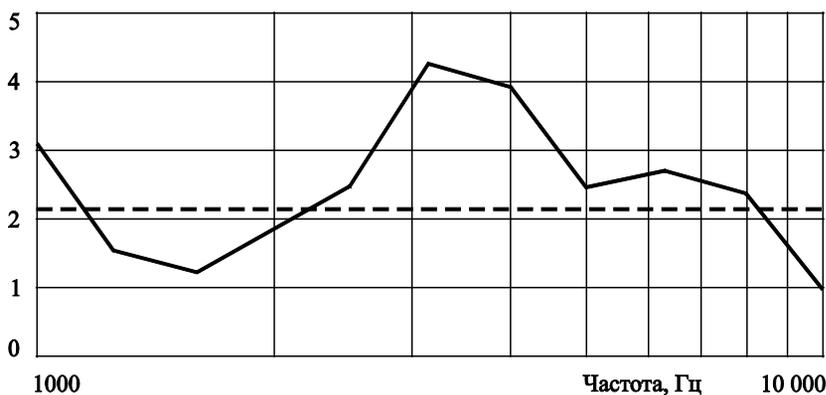
Из представленных на рис. 6 данных следует, что дисперсии выборок значений УПШ, полученных по алгоритмам  $\overline{P^2}$  и П, можно считать значительно не различающимися с вероятностью ошибки первого рода 0,05.

Для сравнения средних значений использовался критерий Стьюдента ( $t$ ). Вычисля-

лось фактическое значение статистики по формуле (8):

$$t = \frac{\sqrt{N_1 + N_2}}{\sqrt{D_{\overline{P^2}} + D_{\overline{П}}}} \cdot |\overline{\Pi} - \overline{P^2}| \quad (8)$$

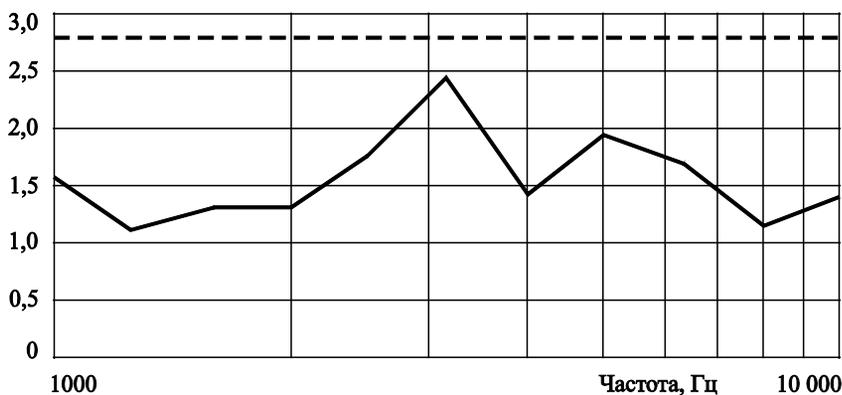
и сравнивалось с критическим значением  $t_{кр}(14, 0,05) = 2,145$ . Результаты сравнения представлены на рис. 7.



**Рис. 7.** Статистика Стьюдента и критическое значение  $t_{кр}(14, 0,05)$ ; модель в гидроакустическом бассейне

**Fig. 7.** Student statistic and critical value  $t_{кр}(14, 0,05)$ ; model in the hydroacoustic pool

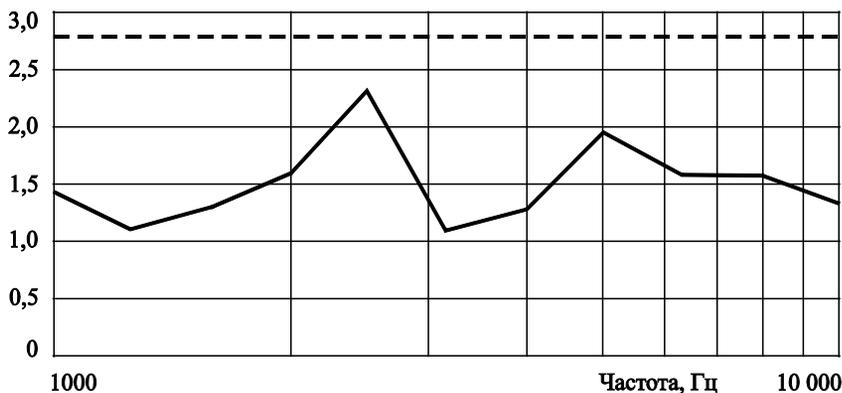
—  $t$   
 - - -  $t_{кр}$



**Рис. 8.** Отношение дисперсий и критическое значение критерия Фишера  $F_{кр}(11, 11, 0,05)$ ; катер на открытой акватории; ПМ № 1

**Fig. 8.** The variance ratio and the critical value of the Fisher criterion  $F_{кр}(11, 11, 0,05)$ ; boat in open waters; receiver No. 1

— отношение дисперсий  
 - - -  $F_{кр}$



**Рис. 9.** Отношение дисперсий и критическое значение критерия Фишера  $F_{кр}(11, 11, 0,05)$ ; катер на открытой акватории; ПМ №2

**Fig. 9.** The variance ratio and the critical value of the Fisher criterion  $F_{кр}(11, 11, 0,05)$ ; boat in open waters; receiver No. 2

— отношение дисперсий  
 - - -  $F_{кр}$

Средние значения УПШ, полученные по алгоритмам  $\overline{P^2}$  и  $\overline{P}$ , можно считать значимо различимыми на фоне случайных отклонений (с вероятностью ошибки первого рода 0,05) в диапазоне частот от 2,5 кГц до 8 кГц, где акустический сигнал имел шумовой характер, и не различимыми в остальном рассмотренном диапазоне. Однако, как показано на рис. 2 и 3, максимальное различие между средними значениями УПШ, полученными различными методами, не превышает 2,2 дБ, что существенно меньше погрешности калибровки канала колебательной скорости, которая составляет 3,5 дБ [5]. При этом погрешность калибровки канала акустического давления не принимается во внимание, т.к. при вычислениях  $\overline{P^2}$  и  $\overline{P}$  используются одни и те же значения акустического давления.

На рис. 8 и 9 представлены отношения дисперсий для данных, полученных на ПМ № 1 и ПМ № 2 соответственно в условиях открытой акватории, и критическое значение критерия Фишера, равное  $F_{кр}(11, 11, 0,05) = 2,79$ .

Из представленных на рис. 8 и 9 данных следует, что дисперсии выборок значений УПШ, полу-

ченных по алгоритмам  $\overline{P^2}$  и  $\overline{P}$ , можно считать значимо не различающимися с вероятностью ошибки первого рода 0,05. Результаты сравнения средних значений  $\overline{P^2}$  и  $\overline{P}$  с использованием фактического значения статистики с критическим значением  $t_{кр}(22, 0,05) = 2,074$  критерия Стьюдента (формула 8) представлены на рис. 10 и 11 для ПМ № 1 и ПМ № 2 соответственно.

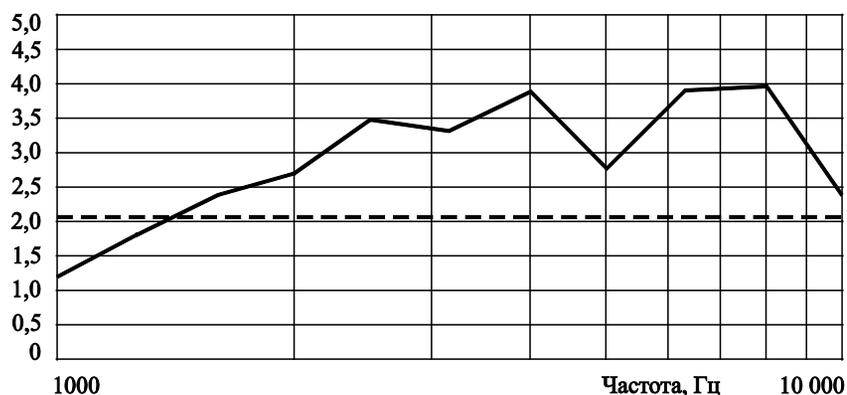
Средние значения УПШ, полученные по алгоритмам  $\overline{P^2}$  и  $\overline{P}$ , можно считать значимо различимыми на фоне случайных отклонений (с вероятностью ошибки первого рода 0,05) практически в диапазоне частот, где уровень сигнала значительно превышает уровень помех (выше 1250 Гц).

Следует отметить, что максимальное различие между средними значениями УПШ, полученными различными методами в условиях открытой акватории, составляет 5,7 дБ (рис. 5), что значительно превосходит границу погрешности калибровки канала колебательной скорости, которая составляет 3,5 дБ [5]. Этот результат говорит о том, что при оценке УПШ источника с использованием

**Рис. 10.** Статистика Стьюдента и критическое значение  $t_{кр}(22, 0,05)$ ; катер в открытой акватории; ПМ № 1

**Fig. 10.** Student statistic and critical value  $t_{кр}(22, 0,05)$ ; boat in open waters; receiver No. 1

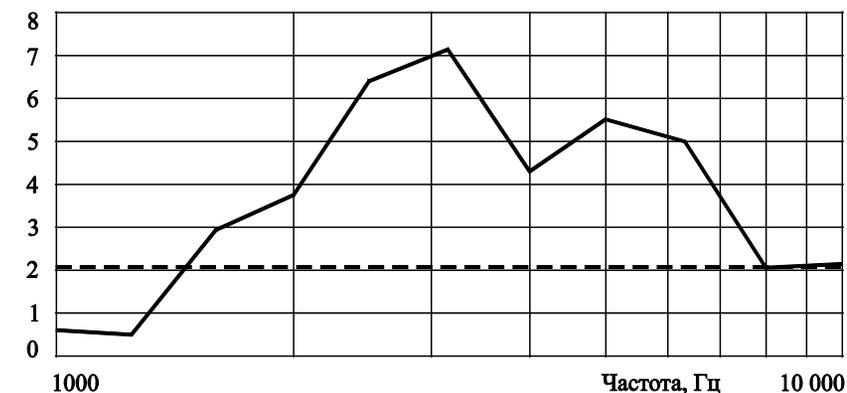
—  $t$   
- - -  $t_{кр}$



**Рис. 11.** Статистика Стьюдента и критическое значение  $t_{кр}(22, 0,05)$ ; катер в открытой акватории; ПМ № 2

**Fig. 11.** Student statistic and critical value  $t_{кр}(22, 0,05)$ ; boat in open waters; receiver No. 2

—  $t$   
- - -  $t_{кр}$



алгоритма  $\bar{P}$  фоновые помехи и отражения от границ акватории в значительной степени подавляются, и результат оценки УПШ более точен, чем при непосредственном измерении  $\overline{P^2}$ .

## Заключение

### Conclusion

В результате экспериментальных исследований показано, что в идеальных условиях шумозаглушенного бассейна оценки уровней подводного шума источника в диапазоне частот от 1 до 10 кГц, получаемые усреднением как квадрата акустического давления, так и плотности потока акустической мощности, не различаются на фоне погрешности калибровки канала колебательной скорости.

При измерениях уровней подводного шума источника, движущегося в условиях реальной акватории с фоновыми шумами и отражениями от границ, использование усредненной по времени плотности потока акустической мощности дает более точную оценку, значимо отличающуюся в меньшую сторону от результатов непосредственного измерения среднего по времени квадрата акустического давления.

## Список использованной литературы

1. Гордиенко В.А., Некрасов В.Н. Векторно-фазовые измерения в гидроакустике: некоторые аспекты использования потока акустической мощности для целей обеспечения единства гидроакустических измерений в условиях морских полигонов. Москва: ВНИИФТРИ, 2007. 451 с.
2. Kim K., Gabrielson T.B., Lauchle G.C. Development of an accelerometer-based underwater acoustic intensity sensor // Journal of the Acoustical Society of America. 2004. Vol. 116, № 6. P. 3384–3392. DOI: 10.1121/1.1804632.
3. Gabrielson T.B., Gardner D.L., Garrett S.L. A simple neutrally buoyant sensor for direct measurement of particle velocity and intensity in water // Journal of the Acoustical Society of America. 1995. Vol. 97, № 4. P. 2227–2237. DOI: 10.1121/1.411948.
4. Сравнение результатов измерений уровней подводного шума источника, полученных прямым методом и с использованием векторно-фазовой обработки / В.А. Калью, Н.В. Краснописцев, Г.И. Лосев [и др.] // Труды Крыловского государственного центра. 2022. Вып. 3(401). С. 121–127. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-121-127.
5. МФРН.411711.020 ФО. Установка для многопараметрических многоканальных комплексных измере-

ний параметров физических полей кораблей УВИ-С. Москва: ВНИИФТРИ, 2023.

## References

1. Gordienko V.A., Nekrasov V.N. Vector/phase measurements in hydro-acoustics: some aspect of using the acoustic power flow for integrated acoustic measurements in sea ranges. Moscow: VNIIFTRI, 2007. 451 p. (in Russian).
2. Kim K., Gabrielson T.B., Lauchle G.C. Development of an accelerometer-based underwater acoustic intensity sensor // Journal of the Acoustical Society of America. 2004. Vol. 116, № 6. P. 3384–3392. DOI: 10.1121/1.1804632.
3. Gabrielson T.B., Gardner D.L., Garrett S.L. A simple neutrally buoyant sensor for direct measurement of particle velocity and intensity in water // Journal of the Acoustical Society of America. 1995. Vol. 97, № 4. P. 2227–2237. DOI: 10.1121/1.411948.
4. Comparison of measurements of underwater-radiated noise levels obtained by direct method and vector/phase processing / V.A. Kalyu, N.V. Krasnopistsev, G.I. Losev [et al.] // Transactions of Krylov State Research Centre. 2022. Vol. 3(401). P. 121–127. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-121-127 (in Russian).
5. MFRN.411711.020 FO. Device UVI-S for multi-parameter multi-channel integrated measurements of ship's physical fields. Moscow: VNIIFTRI, 2023 (in Russian).

---

## Сведения об авторах

Калью Валерий Алексеевич, к.т.н., доцент, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел. +7 (812) 386-69-90. E-mail: v\_kalyu@ksrc.ru.

Краснописцев Николай Вячеславович, начальник лаборатории 522 ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений». Адрес: 141570, Московская область, Солнечногорский район, г.п. Менделеево. Тел.: +7 (495) 526-63-63 (доб. 94-14). E-mail: lab21@vniiftri.ru.

Лосев Герман Игоревич, младший научный сотрудник ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений». Адрес: 141570, Московская область, Солнечногорский район, г.п. Менделеево. Тел.: +7 (495) 526-63-63 (доб. 25-17). E-mail: losev-ga@mail.ru.

Некрасов Виталий Николаевич, д.т.н., профессор, начальник подразделения НИО-5 ФГУП «Всероссийский

научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений». Адрес: 141570, Московская область, Солнечногорский район, г.п. Менделеево. Тел.: +7 (495) 526-63-63 (доб. 25-25). E-mail: nvn@vniiftri.ru.

*Петрова Вера Владимировна*, ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: v\_kalyu@ksrc.ru.

*Смирнов Денис Алексеевич*, к.т.н., старший научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: v\_kalyu@ksrc.ru.

### About the authors

*Valery A. Kalyu*, Cand. Sci. (Eng), Associate Prof., Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-69-90. E-mail: v\_kalyu@ksrc.ru.

*Nikolai V. Krasnopistsev*, Head of Laboratory, Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering” (VNIIFTRI). Address:

Solnechnogorsk district, settlement Mendeleevo, Moscow region, post code 141570. Tel.: +7 (495) 526-63-63 (add 94-14). E-mail: lab21@vniiftri.ru.

*German I. Losev*, Junior Researcher, Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering” (VNIIFTRI). Address: Solnechnogorsk district, settlement Mendeleevo, Moscow region, post code 141570. Tel.: +7 (495) 526-63-63 (add 25-17). E-mail: losev-ga@mail.ru.

*Vitaliy N. Nekrasov*, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Division, Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering” (VNIIFTRI). Address: Solnechnogorsk district, settlement Mendeleevo, Moscow region, post code 141570. Tel.: +7 (495) 526-63-63 (add 25-25). E-mail: nvn@vniiftri.ru.

*Vera V. Petrova*, Lead Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: v\_kalyu@ksrc.ru.

*Denis A. Smirnov*, Cand. Sci. (Eng) Senior Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: v\_kalyu@ksrc.ru.

Поступила / Received: 11.01.24  
Принята в печать / Accepted: 24.05.24  
© Коллектив авторов, 2024