



## ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-135-139  
УДК 534.61

И.В. Грушецкий , И.О. Малинин   
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

# О ЗВУКОИЗЛУЧЕНИИ КОРПУСОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ

**Объект и цель научной работы.** Рассмотрено звукоизлучение в воду однородных тел в виде сферы и сферических оболочек под действием силы с целью оценки приемлемости обычно применяемого упрощенного подхода к прогнозу уровней гидроакустического поля морской техники на низких частотах.

**Материалы и методы.** Расчеты выполнены по аналитическим зависимостям и с применением численного моделирования – метода конечных элементов.

**Основные результаты.** Показано, что звукоизлучение уменьшается при увеличении плотности тела и механического сопротивления оболочки в точке приложения силы. Источником резонансного звукоизлучения являются неоднородности конструкции, например локальные массы, обеспечивающие нейтральную плавучесть морской техники (оборудование, балласт) и создающие реактивные силы, величина которых максимальна на резонансных частотах корпуса.

**Заключение.** Сделан вывод, что для получения достоверных расчетных оценок уровней гидроакустического поля на низких частотах следует учитывать и механическое сопротивление, и неравномерное распределение масс по корпусу, что возможно с применением численного моделирования.

**Ключевые слова:** морская техника, звукоизлучение в воду, механическое сопротивление, метод конечных элементов.  
*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

## SHIP SIGNATURES

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-135-139  
UDC 534.61

I.V. Grushetsky , I.O. Malinin   
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

# LOW-FREQUENCY SOUND RADIATION OF MARINE OBJECT

**Object and purpose of research.** This paper discusses induced noise radiation into water from spherical uniform bodies and spherical shells to estimate the acceptability of commonly used simplified approach to prediction of low-frequency acoustic signatures for marine objects.

**Materials and methods.** The calculations were performed as per analytical expressions and numerical simulation techniques (FEM).

**Main results.** The study has shown that increasing the density of radiating body and increasing mechanical resistance of shell at the location of exciting force reduces noise radiation. Resonant noise radiation typically occurs due to structural non-uniformities of marine objects, like local masses needed to ensure zero buoyancy, e.g. equipment or ballast. These non-uniformities create reactive forces that reach their peak values at resonant frequencies of the hull.

*Для цитирования:* Грушецкий И.В., Малинин И.О. О звукоизлучении корпусов морской техники под действием силы на низких частотах. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 2(404): 135–139.

*For citations:* Grushetsky I.V., Malinin I.O. Low-frequency sound radiation of marine object. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 2(404): 135–139 (in Russian).

**Conclusion.** The study concludes that reliable computational estimate of low-frequency acoustic signatures must take into account both mechanical resistance and non-uniform distribution of masses along hull, which can be done in numerical simulation packages.

**Keywords:** maritime technologies, sound radiation in water, mechanical resistance, finite element analysis.

*The authors declare no conflicts of interest.*

Процессы возбуждения колебаний и звукоизлучения корпусов морской техники (МТ) под действием динамических сил со стороны гребного винта и оборудования являются весьма сложными. Тем не менее в основе многих инженерных методик расчета уровней гидроакустического поля (ГАП) МТ на низких частотах лежит элементарная формула, не учитывающая особенности конструкции корпуса.

В данной статье оценим, насколько приемлемым является такой упрощенный подход. Исследования выполним в последовательности от простого к сложному: от расчетов по элементарным формулам до численного моделирования с применением метода конечных элементов (МКЭ).

Звуковая мощность, излучаемая малым твердым (недеформируемым) телом, которое колеблется в жидкости под действием сосредоточенной гармонической силы  $F$ , рассчитывается, например, по формуле [1]:

$$W_t = \frac{k_0^2 F^2}{24\pi\rho_0 c_0} \gamma_t^2, \quad (1)$$

где  $\rho_0$ ,  $c_0$ ,  $k_0$  – плотность жидкости, скорость звука в ней и волновое число;

$$\gamma_t = \frac{1 + \alpha_g}{\alpha_p + \alpha_g}, \quad \alpha_p = \frac{\rho_t}{\rho_0}, \quad \alpha_g = \frac{V_g}{V_t}, \quad \rho_t - \text{плотность}$$

материала тела;

$V_t$  – объем тела;  $V_g$  – приведенный объем присоединенной массы жидкости, колеблющейся с амплитудой, равной амплитуде колебаний тела.

$$\text{Для тела в форме сферы } \alpha_g = 0,5 \text{ и } \gamma_t = \frac{3\rho_0}{2\rho_t + \rho_0}.$$

Если плотность материала сферы равна плотности

жидкости ( $\rho_t = \rho_0$  – нейтральная плавучесть), то  $\gamma_t = 1$ , и звуковая мощность определяется по известной формуле для расчета звуковой мощности силы в жидкости [2], которая лежит в основе ряда инженерных методик расчета уровней ГАП МТ и отличается от (1) только тем, что не содержит множителя  $\gamma_t^2$ .

Для сферы из стали в воде ( $\rho_t = 7800 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$ )  $\gamma_t = 0,18$ , и звуковая мощность меньше, чем для силы в воде, примерно на 15 дБ; для сферы из титана ( $\rho_t = 4500 \text{ кг/м}^3$ ,  $\gamma_t = 0,3$ ) – на 10 дБ. Для сферы, заполненной воздухом, – воздушного пузырька ( $\rho_t = 1,29 \text{ кг/м}^3$ ,  $\gamma_t = 3$ ) звуковая мощность, наоборот, на 10 дБ больше.

Полученные результаты показывают, что чем больше механическое сопротивление сферы (в данном случае массовое), тем меньше ее звукоизлучение. Отметим, что результаты численного моделирования звукоизлучения сфер разной плотности полностью совпадают с результатами расчетов по формуле (1).

Рассмотрим теперь звукоизлучение сферических оболочек под действием силы. Расчет звукоизлучения выполним с применением МКЭ. Характеристики четырех вариантов оболочек из титана («тонких» и «толстых» толщиной 2,5 и 50 мм соответственно) представлены в таблице. Коэффициент потерь принят 0,05 для всех вариантов.

На рис. 1 представлены результаты расчета звуковой мощности, излучаемой оболочками под действием силы 1 Н, действующей по нормали к оболочке, с использованием МКЭ и по формуле для «силы в воде» (по формуле (1) при  $\gamma_t = 1$ ).

В спектре звукоизлучения сферической оболочки, в отличие от недеформируемой сферы,

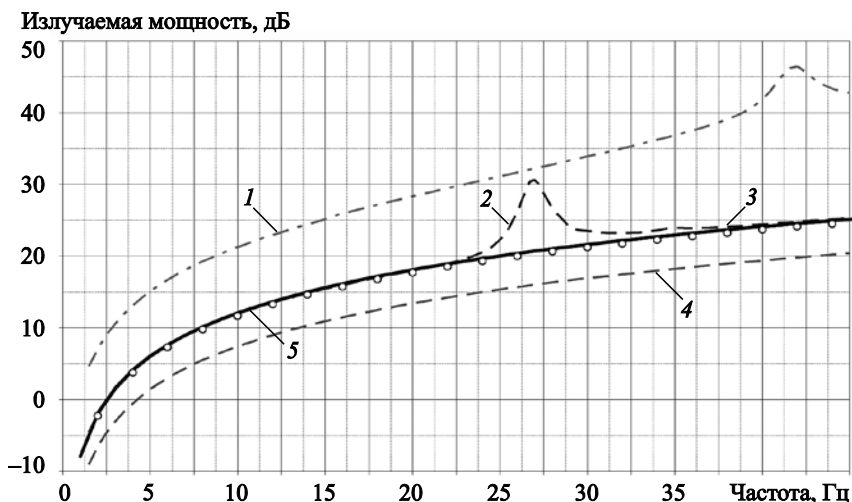
**Таблица.** Характеристики сферических оболочек

**Table.** Parameters of spherical shells

№	Толщина, м	Радиус, м	Среда внутри	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Плавучесть
1	0,0025	2,5	воздух	~25	положительная
2			вода	~1000	нейтральная
3	0,05	1,1	воздух	~1000	нейтральная
4			вода	~2000	отрицательная

**Рис. 1.** Звуковая мощность, излучаемая сферической оболочкой под действием силы (варианты 1–4, расчеты с применением МКЭ), а также расчет по формуле для «силы в воде» (5, сплошная толстая линия)

**Fig. 1.** Acoustic power radiated by spherical shell with different properties, indicated in table, under force excitation (1–4 – finite element analysis, 5 – analytical expression, solid thick curve)



появляются максимумы на частотах резонансных колебаний оболочки. В случае тонкой оболочки большого диаметра (варианты 1 и 2) первый резонанс попадает в рассматриваемый диапазон низких частот.

Если оболочка имеет почти нейтральную плавучесть за счет заполнения водой (вариант 2) или за счет малого диаметра и большой толщины стенки (вариант 3), то излучение, за исключением области резонансов, соответствует «силе в воде». Если оболочка имеет положительную плавучесть (вариант 1), то излучение больше, чем для «силы в воде», примерно на 10 дБ (в дорезонансной области), а при отрицательной плавучести (вариант 4) – меньше примерно на 4,5 дБ. Эти различия соответствуют расчетам по формуле (1), если в качестве плотности тела (сферы) использовать среднюю плотность оболочки и среды во внутреннем объеме (полная масса / полный объем).

Из представленных результатов следует, что нерезонансная составляющая звукоизлучения сферической оболочки нейтральной плавучести (варианты 2 и 3) под действием силы уверенно рассчитывается по формуле для «силы в воде». Изделия МТ тоже имеют в подводном положении плавучесть, близкую к нейтральной, но она достигается за счет размещения внутри тонкой оболочки корпуса различных конструкций, оборудования, балласта. В реальном изделии распределение массы и плавучести вдоль корпуса неравномерное. Рассмотрим, как это влияет на звукоизлучение сферической оболочки.

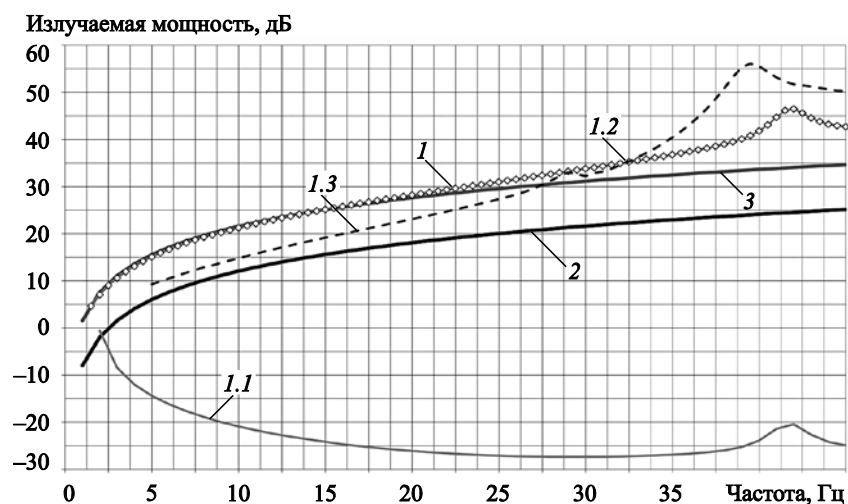
Тонкая оболочка (2,5 мм) большого диаметра (2,5 м) с воздухом внутри (вариант 1 в таблице)

имеет в воде положительную плавучесть 63 500 кг. Ранее нейтральная плавучесть достигалась за заполнением оболочки водой (вариант 2). Последующие расчеты выполним для трех вариантов размещения точечных (сосредоточенных) масс по поверхности оболочки, обеспечивающих нейтральную плавучесть:

1. в точке приложения силы;
2. в геометрически противоположной точке (на другой стороне оболочки);
3. когда масса случайным образом распределена по 10 узлам сетки конечных элементов на поверхности оболочки (в сумме 63 500 кг) и ни одна из масс не находится в точке приложения силы.

Результаты расчетов представлены на рис. 2. При размещении массы в точке приложения силы (линия 1.1) звукоизлучение резко уменьшается, очевидно, по причине резкого увеличения входного механического сопротивления. Если масса находится в геометрически противоположной точке (линия 1.2 – маркеры), то излучение полностью совпадает с излучением оболочки без массы (вариант 1, линия 1 – сплошная линия без маркеров). Это, видимо, связано с тем, что нерезонансное излучение обусловлено деформацией оболочки в области приложения силы. На резонансное же излучение большая точечная масса не влияет, поскольку оказывается в узле низкочастотной формы колебаний оболочки.

Если суммарная масса распределена по 10 точкам на оболочке (линия 1.3 – пунктир), то излучение снижается в дорезонансной области по сравнению с оболочкой без масс, но возрастает



**Рис. 2.** Звуковая мощность (расчеты МКЭ), излучаемая оболочкой с воздухом внутри (1), той же оболочкой с дополнительными массами, обеспечивающими ее нейтральную плавучесть (1.1, 1.2, 1.3), и расчеты звуковой мощности по формуле (1) для сферы с плотностью воды и плотностью воздуха (2 и 3)

**Fig. 2.** Acoustic power radiated by force-excited spherical shell with air inside (1); with added masses for zero buoyancy (1.1, 1.2, 1.3 – finite element analysis) and acoustic power calculations as per Formula (1) for the sphere with density of water and air (2 and 3)

на резонансной частоте, которая ожидаемо немного ниже, чем при отсутствии масс, т.е. по сравнению с линией 1. Увеличение резонансного излучения связано с влиянием реактивных сил и моментов, создаваемых массами, препятствующими колебаниям оболочки. Линии 2 и 3, соответствующие расчетам звуковой мощности по формуле (1) для сферы с плотностью воды (2) и плотностью воздуха (3), представлены на рис. 2 для сопоставления расчетов по простой формуле (1) и МКЭ.

Таким образом, на примере сферических оболочек показано, что низкочастотное звукоизлучение существенно зависит от того, как обеспечивается нейтральная плавучесть. Если это происходит за счет заполнения оболочки водой или увеличения толщины, то излучение оболочки соответствует излучению силы, действующей на оболочку. Такой результат согласуется с данными теоретических исследований, установивших, например, что звукоизлучение балки на низких частотах тождественно излучению действующей на балку силы, если в каждом сечении балки выполняется условие нейтральной плавучести [3].

Когда нейтральная плавучесть обеспечена локальными массами, а не в каждом сечении, то излучение может быть как больше, так и меньше излучения силы в воде. Если располагать массу в точке приложения силы (повышать инерционную составляющую входного механического сопротивления оболочки), то излучение снижается. При другом расположении (не в точке приложения внешней силы) массы являются неоднородностями конструкции, с которыми связаны реактивные силы, и возникает дополнительное звуко-

излучение. Оно называется резонансным, поскольку величина этих сил и вызываемых ими колебаний максимальна на резонансных частотах конструкции.

По результатам представленного расчетного исследования можно сделать следующие основные выводы.

1. Нерезонансное излучение оболочки, нейтральная плавучесть которой обеспечена локальными массами, размещенными не в точке приложения внешней силы, превышает рассчитанное по формуле для «силы в воде». Условие нейтральной плавучести выполняется для такой конструкции только в целом, а не в каждом сечении.
2. И нерезонансное, и резонансное звукоизлучения оболочки уменьшаются при увеличении механического сопротивления в точке приложения силы. Этот вполне ожидаемый расчетный результат подтверждает целесообразность повышения механического сопротивления корпусов МТ, на которые действуют силы со стороны гребного винта, оборудования, натекающего потока, а также необходимость учета механического сопротивления при расчете звукоизлучения.
3. Несмотря на то, что в основе ряда инженерных методик расчета уровней ГАП МТ лежит формула для «силы в воде», а неравномерное распределение масс и плавучести и повышенное механическое сопротивление конструкций, к которым приложены силы, не учитываются, результаты расчета суммарных по всем источникам уровней ГАП обычно удовлетворительно

согласуются с результатами измерений. Можно предположить, что отдельные недочеты методик компенсируют друг друга. Например, неучет того, что нейтральная плавучесть обеспечивается локальными массами, а не в каждом сечении, занижает результат расчета, а неучет повышенного механического сопротивления в районах приложения к корпусу сил, наоборот, его завышает. Повышение достоверности расчетных оценок уровней ГАП МТ может быть достигнуто за счет применения численного моделирования и МКЭ.

## Список использованной литературы

1. *Маслов В.Л., Будрин С.В.* Методы управления акустическими полями в инженерных конструкциях. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. 328 с.
2. *Лэмб Г.* Динамическая теория звука / Пер с англ. *Н.С. Агеевой* ; Под ред. *М.А. Исаковича*. Москва : Физматгиз, 1960. 372 с.
3. *Миниович И.Я., Перник А.Д., Петровский В.С.* Гидродинамические источники звука. Ленинград : Судостроение, 1972. 478 с.

## References

1. *Maslov V.L., Budrin S.V.* Methods of acoustic signature management for engineering structures. St.-Petersburg : Krylov Central Research Institute, 2010. 328 p. (*in Russian*).

2. *Lamb H.* The dynamical theory of sound / Translated from English by *N.S. Ageeva* ; Ed. *M.A. Isakovich*. Moscow : Physmathgiz, 1960. 372 p.
3. *Miniovich I.Ya., Pernik A.D., Petrovsky V.S.* Hydrodynamic sources of sound. Leningrad : Sudostroyeniye, 1972. 478 p. (*in Russian*).

---

## Сведения об авторах

*Грушецкий Игорь Викторович*, к.т.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр. Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-69-89. E-mail: igor@grushetsky.ru. <https://orcid.org/0009-0006-6770-7539>.  
*Малинин Иван Олегович*, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр. Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-01. E-mail: ivan.malinin@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0000-4618-267X>.

## About the authors

*Igor V. Grushetsky*, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-69-89. E-mail: igor@grushetsky.ru. <https://orcid.org/0009-0006-6770-7539>.

*Ivan O. Malinin*, Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-48-01. E-mail: ivan.malinin@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0000-4618-267X>.

Поступила / Received: 01.02.23  
Принята в печать / Accepted: 06.06.23  
© Грушецкий И.В., Малинин И.О., 2023