



## Исследование свойств и совместной работы резонансных звукопоглотителей в зависимости от их геометрии и взаимного расположения

<b>К. А. Костылев</b>	кандидат технических наук, заведующий сектором акустического инжиниринга; «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН), Нижний Новгород; kostylev@ipfran.ru
<b>М. Б. Салин</b>	кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией виброакустики отдела физической акустики; «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН), Нижний Новгород; mikesalin@ipfran.ru
<b>Д. А. Костеев</b>	младший научный сотрудник лаборатории виброакустики отдела физической акустики; «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН), Нижний Новгород; dkosteev@ipfran.ru
<b>И. А. Усачева</b>	старший лаборант-исследователь лаборатории виброакустики отдела физической акустики; «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН), Нижний Новгород; usacheva@ipfran.ru
<b>А. С. Горшонков</b>	инженер сектора акустического инжиниринга; «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН), Нижний Новгород; gorshonkov@ipfran.ru
<b>О. О. Егошин</b>	техник лаборатории виброакустики отдела физической акустики; «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН), Нижний Новгород; bpk626@ipfran.ru

*В настоящее время проблема снижения шума, генерируемого морским оборудованием во время эксплуатации, остается актуальной и недостаточно исследованной. Чрезмерный шум не только негативно влияет на морскую жизнь, но и может стать инструментом экономического давления на суда из «нежелательных» стран. Данное исследование является частью проекта, целью которого является изучение возможности использования резонансных звукопоглотителей в качестве конструкционных материалов для судостроения. Эти инновационные материалы могут быть использованы для изготовления переборок и других конструктивных элементов, которые*

могут не только выполнять базовые функции опоры, разделения и изоляции, но и поглощать шум, что в конечном итоге снижает общий уровень шума, исходящего от судна.

**Ключевые слова:** резонансные звукопоглотители; шумоподавление; метаматериалы; судовые конструкционные материалы; метод передачи функции; метод стоячей волны

**Цитирование:** Костылев, К. А. Исследование свойств и совместной работы резонансных звукопоглотителей в зависимости от их геометрии и взаимного расположения / К. А. Костылев, М. Б. Салин, Д. А. Костеев, И. А. Усачева, А. С. Горшонков, О. О. Егшин // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10, №2. – С. 70–83. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-2-70-83

---

## Введение

В настоящее время проблема снижения шума, генерируемого морским оборудованием во время эксплуатации, остается актуальной и недостаточно исследованной. Подводный шум от судоходства принято рассматривать как составную часть общего экологического ущерба, который человек наносит морской фауне. Чрезмерный шум не только негативно влияет на морскую жизнь, но и может стать инструментом экономического давления на суда, особенно из «нежелательных» стран.

Несмотря на наличие исследований, посвящённых эффективности звукопоглощения резонансных поглотителей, проведённых как в России [2, 3], так и за рубежом [4, 5], эти исследования не учитывают применение резонаторов в качестве судостроительных материалов и их влияние на геометрию, конструкцию и планировку судна.

Известен ряд работ [10–14], посвящённых исследованиям уровней подводного шума различного типа судов. Эта проблема особенно актуальна для научно-исследовательских судов [10], где к акустическим характеристикам предъявляются повышенные требования. Уровень шума, генерируемого специфическим судовым оборудованием, влияет не только на условия обитания экипажа и научных сотрудников, но и на поведение исследуемых рыб, что вносит значительные коррективы в конечный результат исследований. Например, эхоинтеграционная оценка рыбных запасов затруднена из-за отпугивающего действия шума судна, который накладывается на полезный сигнал [11]. С учётом тонкости используемых в настоящее время методов оценки численности и поведения различных промысловых рыб вопрос обеспечения малошумного и относительно высокоскоростного режима хода судна становится принципиальным. На рисунке 1 приведены результаты испытаний научно-исследовательских судов Тихоокеанского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ТИНРО) [10].

В целом же в отечественном судостроении основные усилия по снижению шума преимущественно направлены на обеспечение комфорта экипажа и пассажиров. В нормативной документации [15] до сих пор присутствует понятие ненормируемых по шуму помещений (производственных, служебных, общественных). Традиционный путь борьбы с шумом – внедрение дополнительных элементов звукоизоляции, установка шумогасителей и вибрационной развязки, герметизация помещений в защищаемых зонах. В связи с этим очевидны сложности с внедрением шумоизолирующих и шумопоглощающих материалов и конструкций не только при проектировании и постройке новых судов, но и при модернизации уже построенных судов. Обусловлено это сложностью учёта геометрии и конструктивных особенностей того или иного судна при его модернизации и постройке, неточностями выполнения чертежей и несоблюдением требований заложенных технических мер по борьбе с шумом. Такой подход ведёт к повышенному шумоизлучению судна вовне и его агрессивному воздействию на окружающую среду и, в конечном счёте, на человека.

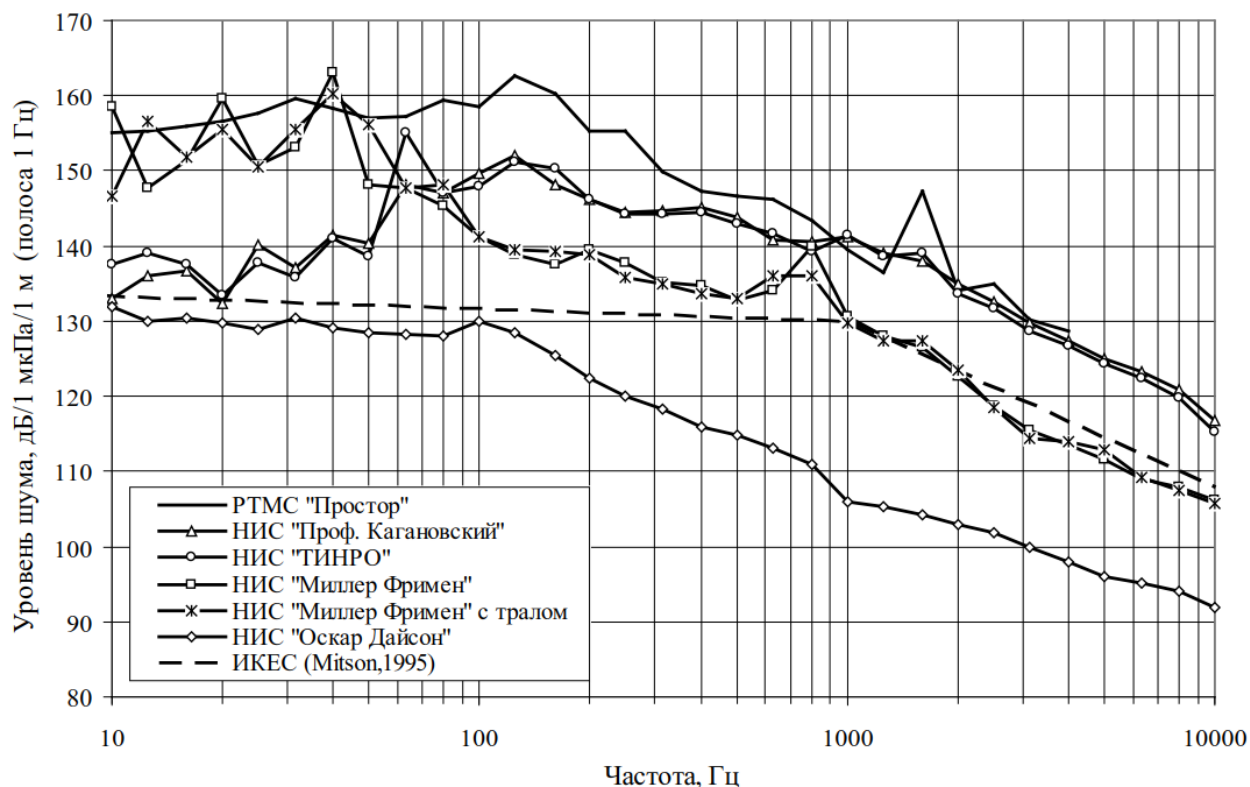


Рисунок 1 – Характеристики подводного шума судов: НИС «Профессор Кагановский» и «ТИНРО» на свободном ходу (9,5 уз), РТМС «Простор» (6,0 уз), НИС «Миллер Фримен» на свободном ходу (11,0 уз) и с пелагическим тралом (3,3 уз) (De Robertis, Wilson, 2006); НИС «Оскар Дайсон» на свободном ходу (11,0 уз) (De Robertis et al., 2008) и рекомендуемый ИКЕС уровень шума (Mitson, 1995)

Вместе с тем конструктивные особенности подавляющего большинства судов, такие как наличие пустот и сложных геометрических переплетений узлов конструкций и агрегатов, создают предпосылки для использования резонансных поглотителей звука. Эти «пустоты» при их тщательном осмыслении и небольшой доработке могут выступать в роли резонансных поглотителей с наперед заданными или корректируемыми характеристиками. Настоящее исследование является частью более масштабного проекта, посвящённого изучению возможности использования резонансных звукопоглотителей в качестве конструкционных материалов для судостроения. Эти материалы могут быть использованы для производства переборок и других конструктивных элементов, которые не только выполняют традиционные несущие функции опоры и изоляции, но и активно поглощают шум, тем самым снижая общий уровень шума, исходящего от судна.

Протяжённая звукопоглощающая переборка, состоящая из множества повторяющихся ячеек (резонаторов), может быть классифицирована как метаматериал. В данном случае резонаторы выступают в роли метаатомов, а периодическая структура, искусственная природа материала и резонансный принцип действия являются ключевыми характеристиками, определяющими его метаматериальные свойства. Само собой разумеется, характерные геометрические размеры резонаторов на порядок меньше длины волны, с которой они взаимодействуют.

Перспективность применения таких резонаторов была подтверждена ранее [1], где была продемонстрирована их эффективность при интеграции в конструкцию судна на примере мелкомасштабной модели. В настоящей работе основное внимание уделяется изучению экстремальных вариаций геометрических параметров этих поглотителей, оценке их эффективности в условиях таких вариаций и возможности размещения резонаторов на единой опорной плите.

Детально изучается взаимодействие этих резонаторов друг с другом и оценивается структурная жизнеспособность полученных образцов для создания протяжённых перегородок. Были проведены специальные эксперименты с индивидуальными резонаторами, настроенными на определённые частоты, а затем эти резонаторы были объединены на одной несущей конструкции для оценки их совместного действия. Экспериментальная установка позволяла одновременно исследовать до шести резонаторов. Ряд экспериментов был направлен на установление оптимального и практичного сочетания геометрических параметров резонаторов с упором на достижение единой резонансной частоты путём изменения длины горловины, диаметра и рабочего объёма резонаторов. Результаты этих экспериментов подробно описаны ниже.

## 1 Методы исследования

В рамках данного исследования представлен гибридный расчётно-экспериментальный подход, направленный на изучение акустических свойств резонаторов. Экспериментальная часть методики основана на использовании двух стандартизированных методов: а) метода передаточной функции (ISO 10534-2:2023 [6]) и б) метода стоячей волны (ISO 10534-1:1996 [7]). Применение двух независимых методик позволяет произвести сравнение полученных результатов, произвести оценку погрешностей абсолютных значений измеренных величин и оценить их адекватность с помощью независимых методик. Такой подход повышает достоверность и точность получаемых результатов, а исследование становится более надёжным и комплексным.

### А. Метод передаточной функции (ISO 10534-2:2023)

Для проведения экспериментов материал закрепляется на одном конце прямой, жёсткой, гладкой и герметичной импедансной трубы (см. рисунок 2). Звуковые волны генерируются внутри трубы звуковым источником (с использованием случайной, псевдослучайной последовательности или чирпов), а звуковое давление измеряется в двух точках рядом с образцом. Для расчёта комплексной акустической функции передачи двух сигналов микрофонов рассчитывается комплексный коэффициент отражения при нормальном падении, коэффициент поглощения при нормальном падении (1) и коэффициент импеданса исследуемого материала.

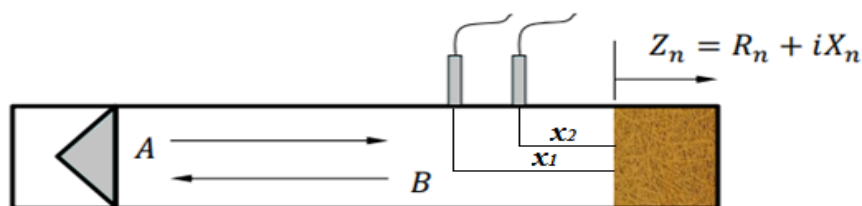


Рисунок 2 – Схематичное представление импедансной трубы (метод двух микрофонов)

$$r = |r|e^{j\phi_r} = \frac{H_{12} - H_l}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1}, \quad (1)$$

где  $H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}}$ ,  $H_l = \frac{p_{2l}}{p_{1l}} = e^{-jk_0(x_1 - x_2)} = e^{-jk_0s}$  и  $H_R = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = e^{jk_0(x_1 - x_2)} = e^{jk_0s}$ .

Эти значения определяются как функции частоты с заданным разрешением, которое зависит от частоты дискретизации и продолжительности записи в цифровой системе частотного анализа, используемой для измерений. Диапазон частот определяется шириной трубы и расстоянием между микрофонами.

*В. Метод стоячей волны (ISO 10534-1:1996(E))*

Исследование акустических свойств образцов проводилось аналогично предыдущему методу, но с некоторыми изменениями. В этом случае использовались три микрофона, один из которых был размещён на подвижном стержне внутри трубы, как показано на рисунках 3 и 4.

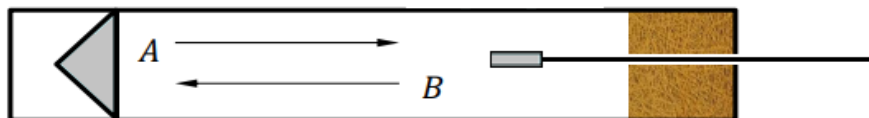


Рисунок 3 – Схематичное представление импедансной трубы (метод стоячей волны)

$$|r| = \frac{S-1}{S+1}, \tag{2}$$

где  $S = \frac{|p_{max}|}{|p_{min}|}$ .

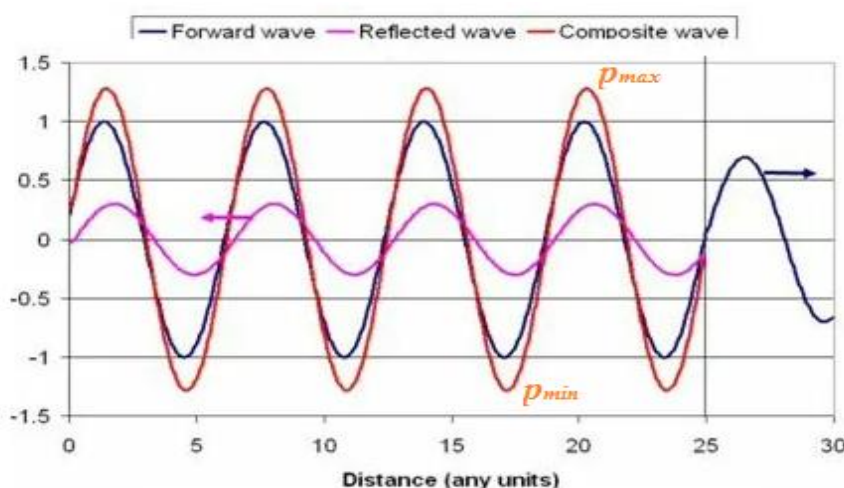


Рисунок 4 – Некоторые пояснения к методу стоячей волны

Расчётная часть представленной исследовательской работы включает в себя численный анализ с применением метода конечных элементов (МКЭ), реализованного посредством отечественного программного обеспечения «САТЕС», специально адаптированного для моделирования сложных акустических систем [8,9]. В соответствии с поставленной задачей была разработана математическая модель, описывающая линейные процессы взаимодействия звуковых волн между собой и с резонаторами. Математическая постановка для расчётной области включает в себя уравнение Гельмгольца, записанное в следующем виде:

$$\Delta p + k^2 p = f, \tag{3}$$

где  $p(r, t)$  – акустическое давление, определяющееся  $r$  пространственной и  $t$  временной переменными,  $f(r, t)$  – внешняя нагрузка,  $k = \omega/c$  – волновое число.

Расчётная геометрическая модель содержит воздушные объёмы внутри импедансной трубы и внутри каждого из рассматриваемых резонаторов системы, размеры и конфигурация которых точно соответствовали используемой экспериментальной установке. Для проведения расчётов была сгенерирована подробная сетка, состоящая из прямоугольных элементов со средним линейным размером 5 мм по объёму трубы и сгущением в области резонаторов до 1

мм (см. рисунок 5, *a*). В результате полученная расчётная модель состояла из 190 тысяч расчётных ячеек второго порядка. Для цилиндрической границы объёма, соответствующего внутренней области интерферометра, были применены условия акустической жёсткой стенки. Для моделирования плоскотоволнового излучения с одного конца расчётной модели помещалась система монополей (см. рисунок 5, *б*).

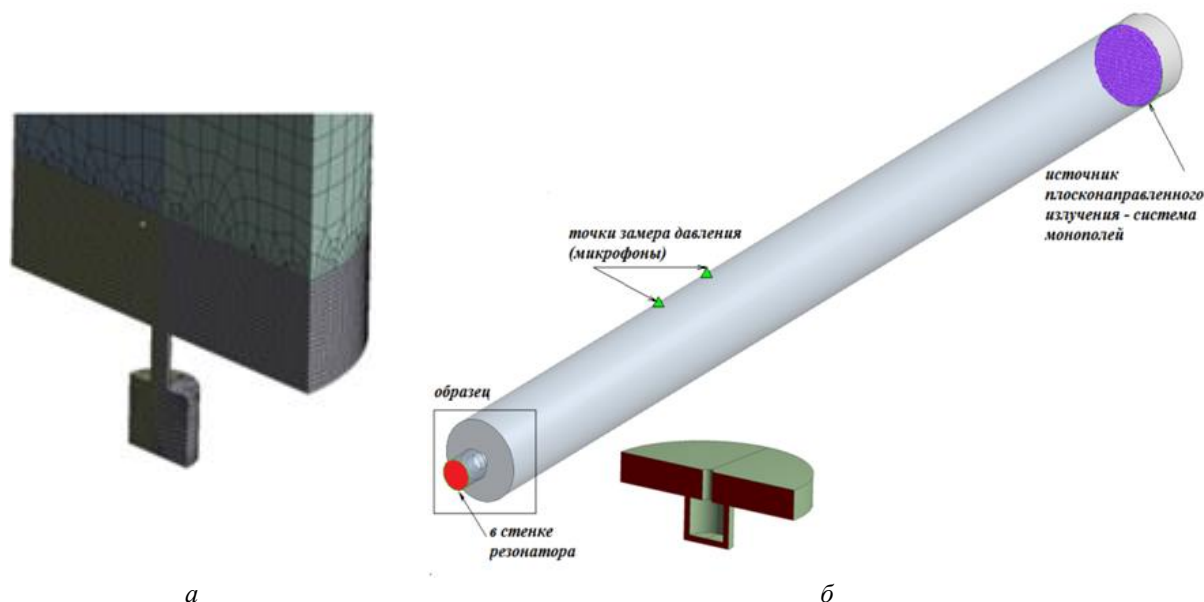


Рисунок 5 – Общий вид расчётной модели:  
*a* – сгущение сетки в области резонатора; *б* – расчётная геометрическая модель

Окружающая среда – воздух – имела температуру 22 °С, что соответствует параметрам: скорость звука 343 м/с и плотность 1,2 кг/м<sup>3</sup>. Известно, что поглощение звука в резонаторе происходит за счёт вязкостных и тепловых потерь в стенке, горле и кромках структуры. Поскольку в настоящее время в программном пакете «САТЕС» не реализована возможность учёта вязкостных потерь в среде, для воспроизведения поглощающих параметров образцов в рассматриваемую численную модель была введена поглощающая стенка резонатора, характеристики которой подбирались на основе верификационных данных, полученных при эксперименте.

При вычислении коэффициента поглощения осуществлялся расчёт акустического давления в том же диапазоне частот и в тех же точках (соответствующих центральной оси микрофонов натурального интерферометра) расчётной области, что и в эксперименте. Полученные амплитудно-частотные характеристики обрабатывались методом передаточной функции, аналогично измерительному подходу. Результаты вычислительных экспериментов – зависимости коэффициента поглощения от частоты – будут проанализированы в следующих разделах.

## 2 Объекты исследования

Объектами для исследований в настоящей работе выступили различные конструктивные исполнения резонаторов Гельмгольца, проектирование и изготовление которых является итерационным процессом и велось в несколько этапов:

- классический расчёт резонаторов;
- математическое твердотельное моделирование резонатора;
- расчёт «цифрового двойника» опытных образцов в специализированных CAD/CAM/FEM системах проектирования;

- изготовление опытных образцов методом 3D-печати;
- исследование резонаторов в импедансной трубе методом передаточной функции и методом стоячей волны, сравнение результатов двух экспериментов между собой;
- корректировка 3D модели и конечно-элементной модели резонатора;
- повторный расчёт резонатора в специализированных *CAD/CAM/FEM* системах проектирования, повторное изготовление резонатора методом 3D-печати;
- повторное исследование резонатора в импедансной трубе, подтверждение полученных характеристик методом передаточной функции и методом стоячей волны.

Начальным этапом создания резонатора является моделирование и изготовление резонатора Гельмгольца цилиндрической формы с горлышком круглого сечения.

Такой резонатор является классическим и считается наиболее простым для расчёта собственной частоты, на которой осуществляется наиболее эффективное поглощение падающей звуковой волны. Однако с точки зрения практического расчёта очевидно: задача является параметрической и имеет множество решений. Подбор геометрических параметров  $S$ ,  $V$ ,  $l$ ,  $\Delta l_i$  должен осуществляться таким образом, чтобы их набор одновременно удовлетворял определённым конструктивным требованиям, налагаемым эксплуатационными условиями конечного изделия, и обеспечивал соответствие собственной частоты резонатора определённому значению  $f_0$ .

Собственная частота резонатора Гельмгольца определяется следующим выражением:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(l + \Delta l_i)}}, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения горлышка резонатора;  $V$  – объём внутренней полости резонатора;  $(l + \Delta l_i)$  – эффективная длина горла резонатора;  $\Delta l_i$  – поправочный коэффициент, зависящий от формы горлышка и от площади поперечного сечения.

Исходя из полученных значений  $S$ ,  $V$ ,  $l$ ,  $\Delta l_i$ , при известной (искомой) собственной частоте резонатора Гельмгольца, определяются геометрические характеристики опытных образцов для дальнейших исследований. Поиск оптимального значения перечисленных параметров с рядом ограничений осуществлялся с помощью программы нелинейной оптимизации для анализа «что-если», использующей алгоритм симплекс-метода. Целевая функция задаётся формулой (4), а на значения переменных параметров накладываются ограничения, позволяющие избежать недоразумений типа отрицательного объёма и придать всей задаче физический смысл.

На рисунке 6 представлен изготовленный резонатор Гельмгольца.



Рисунок 6 – Общий вид экспериментального образца (пример реализации 6-ти резонаторов на одной плите)

### 3 Инструментарий

Для исследовательских целей была спроектирована и построена экспериментальная установка, включающая импедансную трубу, расположенную внутри безэховой камеры. Компоненты установки подробно описаны на рисунке 7.

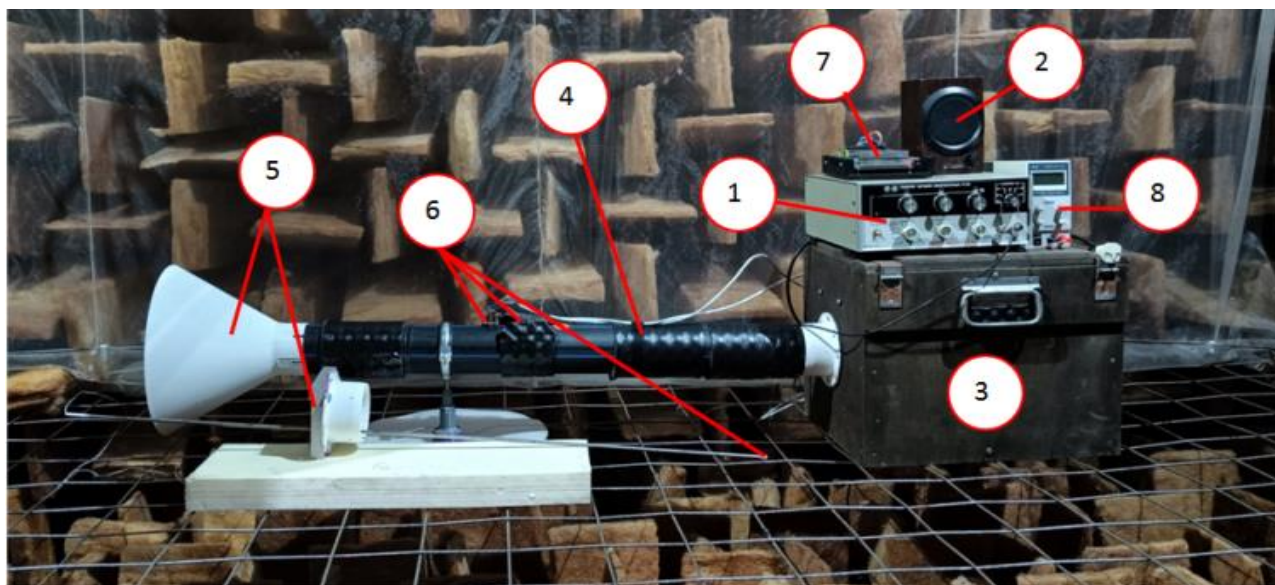


Рисунок 7 – Общий вид экспериментальной установки

1 – генератор сигнала; 2 – усилитель мощности; 3 – звуковой источник; 4 – импедансная труба; 5 – испытуемый образец; 6 – микрофоны; 7 – сборщик сигналов; 8 – источник питания.

### 4 Проведение эксперимента

В соответствии с методологией, описанной в вышеупомянутых стандартах ISO, калибровка импедансной трубы проводится перед каждым экспериментальным циклом. В наших исследованиях этот процесс был разделен на три этапа: эксперименты с полным отражением, эксперименты с полным поглощением и проведение эксперимента с материалом известного коэффициента поглощения (например, акустический изоляционный материал).

Для моделирования полного поглощения был разработан специальный рупор. Этот рупор, учитывая размещение трубы в безэховой камере, обеспечивает полное рассеивание излучаемых волн за пределами импедансной трубы и гарантирует, что источник излучения не подвержен его влиянию. Результаты эксперимента показаны на рисунке 8.

Для имитации полного отражения использовалась жёсткая массивная стенка, размещённая на выходе из импедансной трубы. При такой конфигурации энергия излучаемой волны от источника полностью отражается обратно в трубу от стенки. Результаты измерения коэффициента поглощения в этом контексте показаны на рисунке 9.



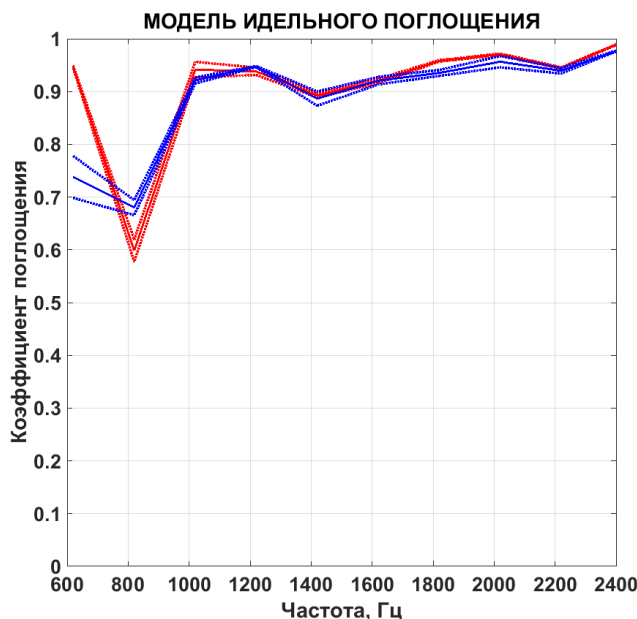


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента поглощения от частоты (Полное поглощение):  
1 – метод передачи функции (красн.);  
2 – метод стоячей волны (син.)

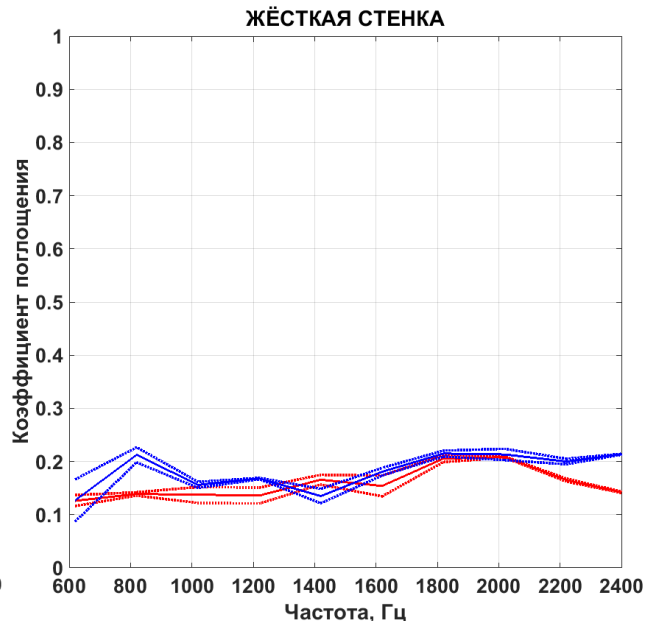


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента поглощения от частоты (Полное внутреннее отражение):  
1 – метод передаточной функции (красн.),  
2 – метод стоячей волны (син.)

### 5 Результаты

После калибровки были исследованы различные конструкции резонаторов с точки зрения их эффективности звукопоглощения. Целью этих экспериментов было экспериментально проверить, что возможно спроектировать резонаторы, которые удовлетворяют как требованиям эффективного звукопоглощения, так и требованиям для размещения в судовых конструктивных элементах для их последующей интеграции. Некоторые результаты этих экспериментов показаны на рисунках 10...12.

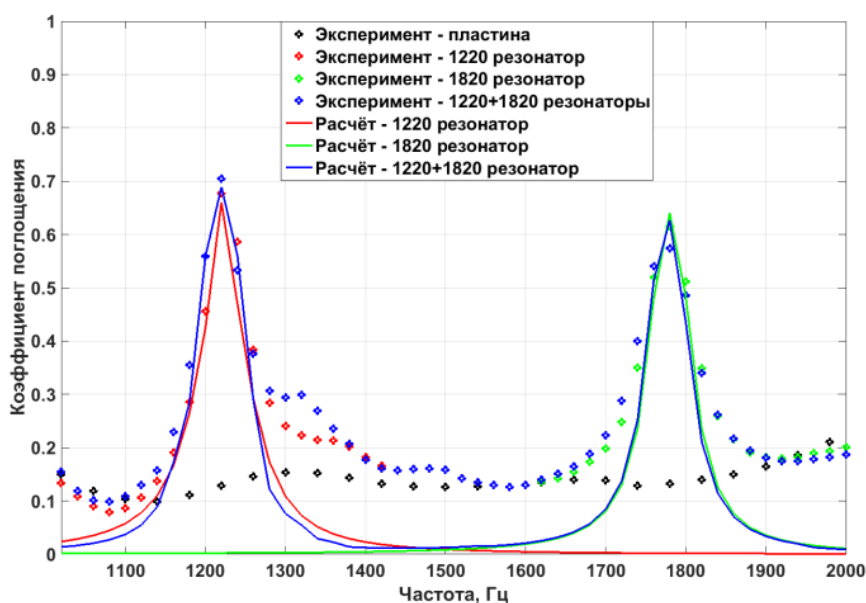


Рисунок 10 – Сравнение работы системы из двух резонаторов с работой каждого резонатора по отдельности

На рисунке 10 представлено сравнение работы системы из двух резонаторов с резонансными частотами 1200 Гц и 1800 Гц. В первом случае резонаторы расположены на несущей пластине по отдельности, а во втором – вместе на одной пластине. Анализ графика показывает, что взаимное влияние резонаторов, если оно и присутствует, незначительно в данных условиях и им можно пренебречь.

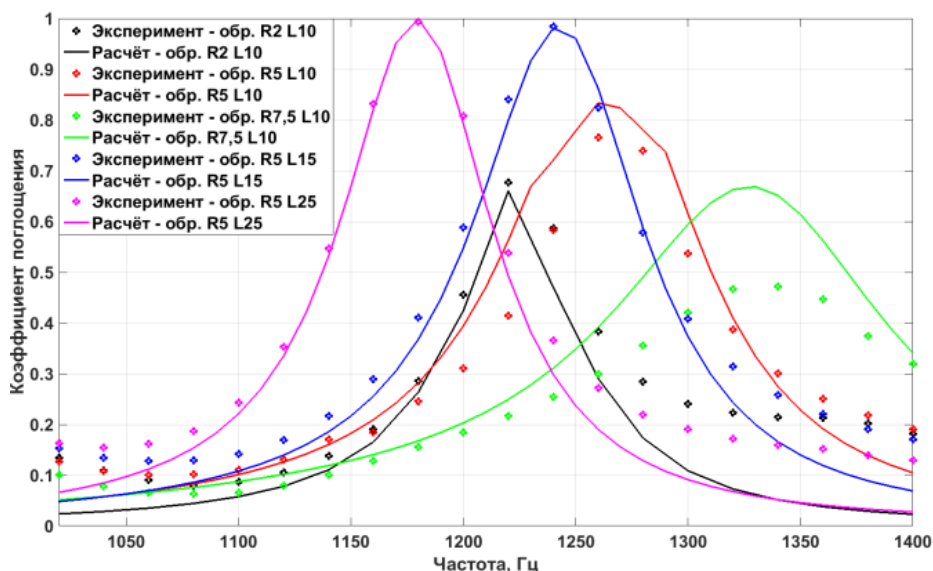


Рисунок 11 – Сравнение коэффициентов поглощения резонаторов, настроенных на одну частоту, но имеющих различные геометрические параметры.

На рисунке 11 представлены результаты сравнительных экспериментов, направленных на изучение влияния геометрической формы резонаторов на их характеристики. В качестве регулируемых параметров использовались диаметр горлышка резонатора и его длина. Проведённые эксперименты позволили определить оптимальные значения этих параметров для последующих исследований.

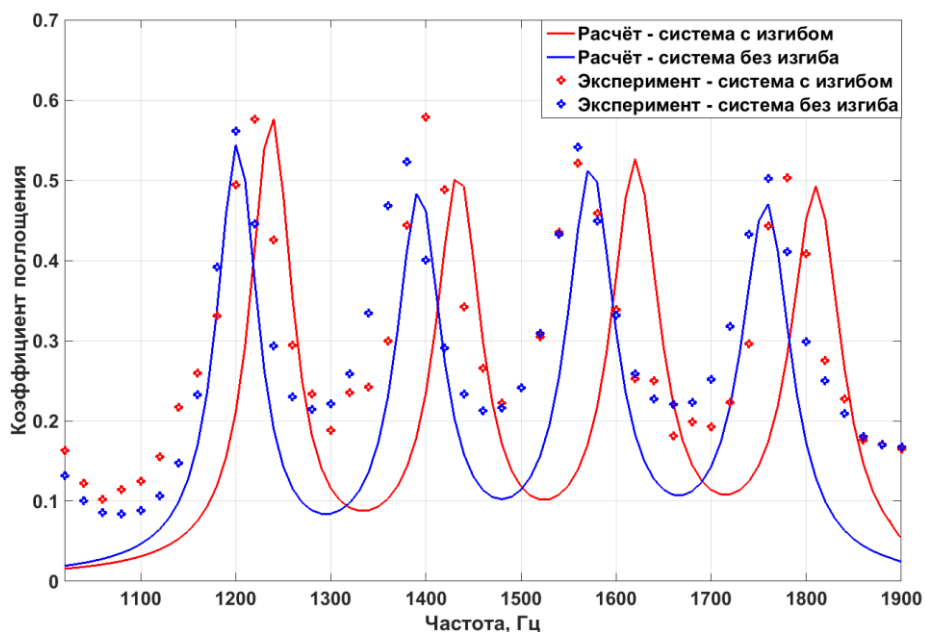


Рисунок 12 – Сравнение коэффициентов поглощения резонаторов разной формы

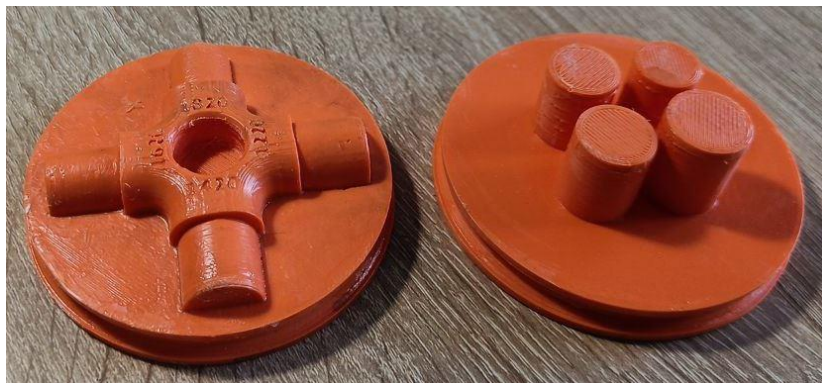


Рисунок 13 – Испытуемые образцы резонаторов разной формы

На рисунках 12 и 13 представлены результаты экспериментальной отработки формы горлышка резонатора. В исследовании были использованы резонаторы с оптимальным сочетанием параметров, реализованные в двух вариантах: с прямым горлышком и горлышком, изогнутым по радиусу. Результаты показали, что резонаторы с прямым горлышком более точно попадают в целевую резонансную частоту. Однако для резонаторов с изогнутым горлышком наблюдается постоянное отклонение резонансной частоты, не зависящее от её значения. Это позволяет внести постоянную поправку в расчётные формулы, что в конечном итоге позволяет создавать резонаторы с требуемыми резонансными частотами, но с меньшими размерами по сравнению с резонаторами с прямым горлышком. Внешний вид резонаторов представлен на рисунке 13.

### Выводы

Проведены исследования по проектированию судовых материалов с интегрированными резонансными поглотителями шума, подтвердившие их пригодность для конструктивных и несущих функций. Создана и откалибрована лабораторная установка типа импедансной трубы, предназначенная для тестирования разрабатываемых элементов и верификации расчётных данных. Разработана методика учёта влияния формы резонаторов и корректировки резонансной частоты при компактном размещении резонансных объёмов в конструкциях переборок. Проведены эксперименты на модели судна масштаба 1:50 (подробное описание в [1]), которые показали, что уровень подводного шума, излучаемого судном с переборками, оснащёнными резонансными поглотителями, снизился в среднем на 12 дБ по сравнению с судном с классическим корпусным набором. Важно отметить, что эффективность снижения шума существенно зависит от конкретной реализации системы звукопоглощения и может варьироваться в различных случаях и условиях.

### Благодарности

Работа была выполнена в рамках государственного задания Центра гидроакустики ИПФ РАН, тема FFUF-2024-0040 «Разработка физических принципов перспективных акустических систем».

### Список использованных источников

1. Бычков, С. Н. Экспериментальные исследования резонансных поглотителей звука с применением мелкомасштабной модели судна / С. Н. Бычков, А. С. Горшонков, О. О. Егошин, К. А. Костылев, М. Б. Салин // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2023. – Т. 3, no. 405. – С. 151–160.

2. Ghaffarivardavagh, R. Ultra-open acoustic metamaterial silencer based on Fano-like interference / R. Ghaffarivardavagh, J. Nikolajczyk, S. Anderson, X. Zhang // *Physical review*. – 2019. – vol. 99, is. 2. – 024302.
3. Degraeve, S. Metamaterial Absorber for Loudspeaker Enclosures / S. Degraeve, J. Oclec-Brown // *The 148th AES Convention*. – 2020, June 2-5.
4. Комкин, А. И. Поглощение звука резонатором Гельмгольца / А. И. Комкин, М. А. Миронов, А. И. Быков // *Акустический журнал*. – 2017. – Т. 63, № 4. – С. 356-363
5. Бобровницкий, Ю. И. Поглощение звука и метаматериалы / Ю. И. Бобровницкий, Т. М. Томилина // *Акустический журнал*. – 2018. – Т. 64, № 5, – С. 517-525.
6. ISO 10534-2:2023. Acoustics – Determination of acoustic properties in impedance tubes – Part 2: Two microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance. – 2023.
7. ISO 10534-1:1996. Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 1: Method using standing wave ratio. – 1996.
8. Севрюков, О. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022663702 "САТЕС ДК" / О. Севрюков, Е. Соков, А. Суворов и др. – 2022 год.
9. Suvorov, A. S. Software for Acoustic Design / A. S. Suvorov, O. F. Sevriukov, E. M. Sokov, M. B. Salin, S. G. Zaitseva and V. A. Sharagina // *Journal of Applied Mathematics and Physics*. – 2023. – 11, 2515-2522.
10. Кузнецов, М. Ю. Характеристики гидроакустического шума научно-исследовательских судов ТИНРО-центра / М. Ю. Кузнецов, В. И. Шевцов, В. И. Поляничко. // *Известия ТИНРО*. – 2014. – Т. 177. – С. 235-256.
11. Кузнецов, М. Ю. Гидроакустические шумы промысловых и научно-исследовательских судов и их влияние на поведение и оценки запасов рыб (обзор и перспективы исследований) / М. Ю. Кузнецов, В. Н. Вологдин // *Известия ТИНРО*. – 2009. – Т. 157. – С. 334-355.
12. Mitson, R. B. Underwater noise of research vessels: review and recommendations: ICES Cooperative Research Report. – Copenhagen, 1995. – № 209. – 61 p.
13. Mitson, R. B. Causes and effects of underwater noise on fish abundance estimation / R. B. Mitson, H. P. Knudsen // *Aquatic Living Resources*. – 2003. – Vol.16. – pp.255-263.
14. MacGillivray, A. A reference spectrum model for estimating source levels of marine shipping based on Automated Identification System data / A. MacGillivray, C. de Jong // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2021.
15. РД 31.81.81-90. Рекомендации по снижению шума на судах морского флота : Утвержден решением Минморфлота и Минсудпрома СССР от 04.04.1991 N СМ-56/769 : опубликован Министерством морского флота. – Ленинград, 1991.

## Study of the properties and joint operation of resonant sound absorbers depending on their geometry and relative position

<b>K. A. Kostylev</b>	Candidate of Science (Engineering), Head of Acoustic Engineering Sector; Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Nizhny Novgorod, Russian Federation; kostylev@ipfran.ru
<b>M. B. Salin</b>	Candidate of Science (Phys-math), Head of Vibroacoustics Laboratory; Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Nizhny Novgorod, Russian Federation; mikesalin@ipfran.ru
<b>D. A. Kosteev</b>	Junior Research Assistant of Vibroacoustics Laboratory; Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Nizhny Novgorod, Russian Federation; dkosteev@ipfran.ru
<b>I. A. Usacheva</b>	Research Lab Senior Assistant of Vibroacoustics Laboratory; Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Nizhny Novgorod, Russian Federation; usacheva@ipfran.ru
<b>A. S. Gorshonkov</b>	Engineer of Acoustic Engineering Sector; Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Nizhny Novgorod, Russian Federation; gorshonkov@ipfran.ru
<b>O. O. Egoshin</b>	Technician of Vibroacoustics Laboratory; Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Nizhny Novgorod, Russian Federation; bpk626@ipfran.ru

*Currently, the problem of reducing the noise generated by marine equipment during operation remains relevant and insufficiently researched. Excessive noise not only negatively impacts marine life, but can also become a means of economic pressure on ships from "undesirable" countries. This study is part of a project to explore the possibility of using resonant noise absorbers as structural materials for shipbuilding. These innovative materials can be used to manufacture bulkheads and other structural elements that can not only perform the basic functions of support, separation and isolation, but also absorb noise, which ultimately reduces the overall noise level emanating from the vessel.*

**Keywords:** resonant noise absorbers; noise control; metamaterials; ship structural materials; transfer function method; standing wave method

**Citation:** Kostylev, K. A., Salin M. B., Kosteev, D. A., Usacheva, I. A., Gorshonkov, A. S. and Egoshin, O. O. (2024), "Study of the properties and joint operation of resonant sound absorbers depending on their geometry and relative position", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 10, no. 2, pp. 70-83. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-2-70-83. (In Russian; abstract in English).

## References

1. Bychkov, S. N., Gorshonkov, A. S., Egoshin, O. O., Kostylev, K. A. and Salin, M. B. (2023), "Experimental studies of resonant sound absorbers using a small-scale ship model", *Proceedings of the Krylov State Scientific Center*, vol. 3, no. 405, pp.151–160
2. Ghaffarivardavagh, R., Nikolajczyk, J., Anderson, S. and Zhang, X. (2019), "Ultra-open acoustic metamaterial silencer based on Fano-like interference ", *Physical review*, vol. 99, is. 2, 024302.
3. Degraeve, S. and Oclec-Brown, J. (2020), "Metamaterial Absorber for Loudspeaker Enclosures ", *The 148th AES Convention*, 2020, June 2-5.
4. Komkin, A. I., Mironov, M. A. and Bykov, A. I. (2017), "Sound absorption by the Helmholtz resonator", *Acoustic Journal*, vol. 63, no. 4, pp. 356-363
5. Bobrovnikitsky, Yu. I. and Tomilina, T. M. (2018), "Sound absorption and metamaterials", *Acoustic Journal*, vol. 64, no. 5, pp. 517-525
6. ISO 10534-2:2023 (2023), *Acoustics – Determination of acoustic properties in impedance tubes Part 2: Two microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance*.
7. ISO 10534-1:1996 (1996), *Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes Part 1: Method using standing wave ratio*.
8. Sevryukov, O., Sokov, E., Suvorov, A. and others (2022), *Certificate of state registration of the computer program no.2022663702 "SATES DK"*.
9. Suvorov, A. S., Sevriukov, O. F., Sokov, E. M., Salin, M. B., Zaitseva, S. G. and Sharagina, V. A. (2023), "Software for Acoustic Design", *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 11, 2515-2522
10. Kuznetsov, M. Yu., Shevtsov, V. I. and Polyanchko, V. I. (2014), "Characteristics of hydroacoustic noise of TINRO-center research vessels", *Izvestiya TINRO*, vol. 177, pp. 235-256.
11. Kuznetsov, M. Yu. and Vologdin, V. N. (2009), "Hydroacoustic noises of commercial and scientific research vessels and their influence on the behavior and assessment of fish stocks (review and prospects of research)", *Izvestiya TINRO*, vol. 157, pp. 334-355.
12. Mitson, R. B. (1995), *Underwater noise of research vessels: review and recommendations: ICES Cooperative Research Report*, Copenhagen, no. 209, 61 p.
13. Mitson, R. B. and Knudsen, H. P. (2003), "Causes and effects of underwater noise on fish abundance estimation", *Aquatic Living Resources*, vol.16, pp.255-263.
14. MacGillivray, A (2021), "A reference spectrum model for estimating source levels of marine shipping based on Automated Identification System data", *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, Mar 30.
15. RD 31.81.81-90 (1991), *Recommendations for noise reduction on ships of the Navy*, Approved by Ministry of Navy of the USSR dated 04.04.1991 N SM-56/769, Published by Ministry of the Navy, Leningrad.