

УДК 534.6+62-752  
EDN: TLSDBF

В.Ю. Кирпичников, В.В. Савенко, В.Ю. Смольников, А.В. Виноградов  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ С АКУСТИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

**Объект и цель научной работы.** Объектом является толстолистовая судовая конструкция. Цель исследования – определение вибраций конструкции с акустическим покрытием.

**Материалы и методы.** Измерение спектров вибрации конструкции без акустического покрытия и при его установке.

**Основные результаты.** Выявлен частотный диапазон увеличения покрытием уровней вибрации демпфируемой конструкции.

**Заключение.** Показано, что причиной роста уровней вибрации являются упругие колебания листов покрытия.

**Ключевые слова:** толстолистовая конструкция, вибрация, акустическое покрытие, эффективность.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

UDC 534.6+62-752  
EDN: TLSDBF

V.Yu. Kirpichnikov, V.V. Savenko, V.Yu. Smolnikov, A.V. Vinogradov  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## VIBRATION OF THICK-PLATED STRUCTURES WITH ACOUSTIC COATING

**Object and purpose of research.** This paper discusses thick-plated ship structures. The purpose of this study was to determine vibration of a structure with acoustic coating.

**Materials and methods.** Vibration spectra measurements on structure with and without acoustic coating.

**Main results.** The study identified the range where the coating contributes to vibration increase of damped structure.

**Conclusion.** The authors showed that vibration increase was due to elastic vibrations of coating tiles.

**Keywords:** thick-plated structure, vibration, acoustic coating, efficiency.

*The authors declare no conflicts of interest.*

### Введение

#### Introduction

Одним из способов уменьшения шума, излучаемого морскими объектами, является установка на их корпусные конструкции акустических покрытий. С этой целью многие годы применяют, в частности, покрытия на основе резины, размещаемые на наружной поверхности корабельных корпусных конструкций. Такие резиновые покрытия могут также обладать демпфирующими свойствами подобно специальным вибропоглощающим покры-

тиям, основы работоспособности которых описаны, например, в работе [1].

Основным назначением акустических покрытий является шумозаглушение вибрирующих конструкций, возбуждаемых работающим корабельным оборудованием.

Величина шумозаглушающей эффективности ограничивается с водой акустических покрытий определяется совокупностью их вибродемпфирующих, звукопоглощающих и звукоизолирующих свойств, а также инерционно-жесткостными и диссипативными параметрами корпусных конструкций, на ко-

*Для цитирования:* Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Смольников В.Ю., Виноградов А.В. Исследование вибраций толстолистовой конструкции с акустическим покрытием. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 1(407): 93–99.

*For citations:* Kirpichnikov V.Yu., Savenko V.V., Smolnikov V.Yu., Vinogradov A.V. Vibration of thick-plated structures with acoustic coating. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 1(407): 93–99 (in Russian).

торые они установлены. Шумозаглушающая эффективность наружных покрытий на основе резины рассмотрена, например, в работе [2], где приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований зависимости величин типовых покрытий от их звукоизолирующих и отражающих свойств. В частотных зависимостях шумозаглушающей эффективности покрытий, установленных на сравнительно тонкие (5–6 мм) стальные пластины, выявлены диапазоны отрицательной эффективности, в которых покрытия увеличивают шумоизлучение.

Наличие частотного диапазона с отрицательной шумозаглушающей эффективностью покрытия в работе [2] объяснено возникновением резонанса массы демпфируемой пластины на упругости покрытия – явления, подобного резонансу в системе «механизм – амортизаторы – фундамент». Указано, что роль фундамента выполняет вода, с которой контактирует внешняя поверхность покрытия. Однако отсутствие параметров воды в приведенных в работе [2] формулах позволяет предположить, что возникновение соответствующих резонансов связано преимущественно с колебаниями демпфируемой пластины и упругого покрытия.

В настоящей работе выполнены расчетные и экспериментальные исследования вибраций толстолистовой конструкции с акустическим покрытием из резины, находящейся в воздухе, с целью установления наличия или отсутствия в частотной зависимости вибродемпфирования диапазона с отрицательными значениями, подобного описанному в работе [2].

## Расчетные характеристики демпфируемой конструкции

Design parameters of damped structure

В качестве исследуемой демпфируемой конструкции выбрана находящаяся в воздухе толстолистовая конструкция (рис. 1) с нанесенным на нее типовым акустическим покрытием толщиной 0,08 м, имеющим массу единицы площади  $m = 76,8 \text{ кг/м}^2$  и волновое сопротивление  $\rho c = 1,51 \cdot 10^5 \text{ кг/с} \cdot \text{м}^2$ . Конструкция представляет собой стальную подкрепленную плоскую пластину с размерами в плане  $3,2 \times 2,8 \text{ м}$  толщиной 55 мм. Масса единицы площади пластины  $m_{пл}$  равняется  $429 \text{ кг/м}^2$ .

Пластина имеет четыре параллельных коротким кромкам подкрепления (шпангоута) в форме тавра высотой 0,45 м и толщиной 25 мм. Размеры полки тавра: ширина – 0,14 м, толщина – 25 мм. Расстоя-

ние между подкреплениями (шпация) равно 0,77 м. Пластина опиралась тавровыми подкреплениями на резиновые прокладки общей толщиной 0,1 м, расположенные на бетонном полу лабораторного помещения. Семь листов акустического покрытия размерами  $0,5 \times 0,4 \text{ м}$  были приклеены к неподкрепленной (верхней) поверхности пластины симметрично срединной линии ее центральной шпации (рис. 1). Масса покрытия составляла 11,5 % массы демпфируемой шпации.

С целью предварительной оценки акустических свойств описанной динамической системы были выполнены вычисления значений верхней частоты диапазона отрицательной эффективности  $f_k$  и частоты  $f_{\min}$  с наибольшим отрицательным эффектом покрытия, значений низших резонансных частот изгибных, продольных и сдвиговых колебаний в листе покрытия при их распространении в направлении вдоль его кромок и по толщине, а также максимальной величины коэффициента потерь колебательной энергии в конструкции «пластина – покрытие».

Значения частот  $f_k$  и  $f_{\min}$  определялись с использованием формул (1) и (2), приведенных в работе [2]:

$$f_k = 0,55 \frac{\rho c}{m} \left\{ 1 + \frac{m}{4m_{пл}} - \left[ 1 + \frac{m}{6m_{пл}} \left( 1 + \frac{3m}{8m_{пл}} \right) \right]^{1/2} \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

$$f_{\min} = 0,28 \frac{\rho c}{m} \left\{ 1 + \frac{m}{2m_{пл}} - \left[ 1 + \frac{m}{3m_{пл}} \left( 1 + \frac{3m}{4m_{пл}} \right) \right]^{1/2} \right\}^{1/2}. \quad (2)$$

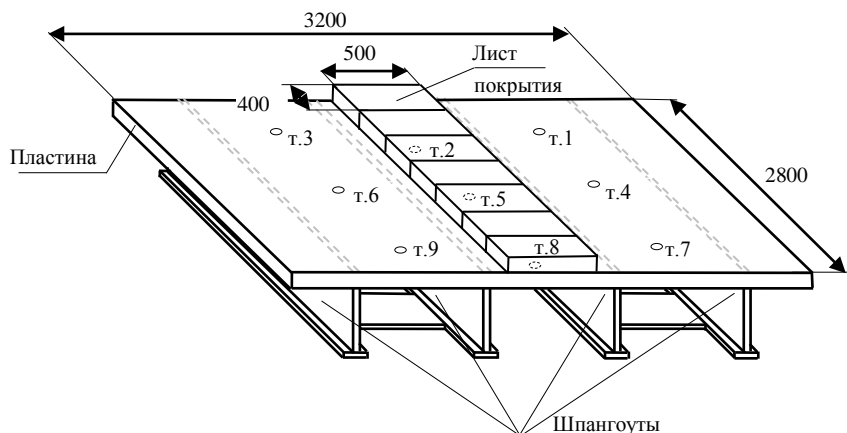
Расчетные значения  $f_k$  и  $f_{\min}$  оказались равными 184 и 128 Гц соответственно.

Низшая резонансная частота  $f_n$  предположительно возникающих в листе покрытия изгибных колебаний вычислялась с использованием формулы для скорости их распространения  $c_n = 0,54 \sqrt{\omega h c}$  ( $\omega = 2\pi f$ ;  $h = 0,08 \text{ м}$ ;  $c = 157 \text{ м/с}$ ) и ее значения ( $c_n = \lambda_n f$ ) при длине  $\lambda_n$  изгибной волны, равной удвоенному размеру наибольшей кромки листа покрытия. (Скорость  $c$  соответствует 50 % объемного содержания воздуха у поверхности покрытия, контактирующей с пластиной). Значение  $f_n$  оказалось равным 23 Гц.

Низшие резонансные частоты продольных и сдвиговых колебаний в листах покрытия между его кромками определялись по формулам  $f_{пр} = c/2\ell_{1,2}$  и  $f_{сд} = 0,58c/2\ell_{1,2}$  ( $\ell_1$  и  $\ell_2$  – размеры листа покрытия в плане). Соответствующие значения  $f_{пр}$  равняются 157 и 196 Гц, а  $f_{сд}$  – 91 и 114 Гц.

**Рис. 1.** Схема конструкции с покрытием и точками измерения вибрации

**Fig. 1.** Layout of structure with coating and vibration measurement points



Значение низшей резонансной частоты колебаний по толщине покрытия с наибольшими деформацией и эффективностью покрытия при динамическом возбуждении стальной пластины поперечной силой вычислялось с использованием формулы  $f = c/4h$  [1] и оказалось равным  $\sim 491$  Гц.

Максимальное расчетное значение коэффициента потерь колебательной энергии конструкции с покрытием определялось согласно [1] по формуле

$$\eta = \frac{\eta_2}{1 + 1,23\mu\eta_2^2}, \text{ где } \eta_2 \text{ – коэффициент потерь по}$$

крытия,  $\mu = m_{пл}/m = 5,58$ . При  $\eta_2 = 0,05$  имеем  $\eta = 0,049$ .

## Метод экспериментальных исследований

Method of experimental studies

Исследования вибрационных характеристик толстолистовой конструкции и вибродемпфирующей эффективности акустического покрытия проводились при периодическом ударном возбуждении пластины с покрытием вибромолотком массой 3,5 кг с установленным на нем датчиком силы. Измерялись с использованием вибродатчиков уровни входной (в точке возбуждения) и переходной (в других точках) вибровозбудимости демпфируемой пластины. Под вибровозбудимостью  $A/F$ , дБ, подразумевается отношение виброускорения  $A$ ,  $m/c^2$ , к возбуждающей силе  $F$ , Н, равное величине  $A/F = 20\lg(AF_0/aF)$ , дБ, где  $a$  – пороговый уровень виброускорения,  $10^{-6} m/c^2$ ;  $F_0 = 1$  Н.

Точки удара и измерения уровней входной вибровозбудимости пластины находились на срединной линии центральной шпации со стороны нижней подкрепленной поверхности пластины. Одна из точек (№ 5) располагалась в геометрическом центре

(ГЦ) шпации и пластины в целом, а две другие (№ 2 и № 8) – на одинаковом расстоянии от ГЦ и кромок пластины. Измерения переходной вибровозбудимости осуществлялись в точках № 3, 6 и 9 (рис. 1) при ударе по пластине в точках № 1, 4 и 7 соответственно. Эти точки находились на верхней поверхности пластины. Они располагались подобно точкам № 1, 2 и 8 в двух соседних с центральной шпациях пластины. Измерения уровней входной и переходной вибровозбудимостей пластины проводены в частотном диапазоне 20–1600 Гц.

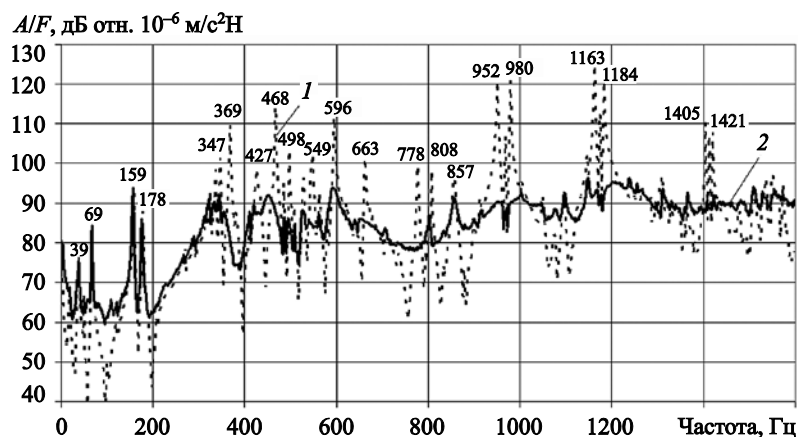
Вибродемпфирующей эффективностью испытанного акустического покрытия будем называть снижение уровней входной или переходной вибровозбудимости пластины при наличии на ней покрытия в сравнении с уровнями вибровозбудимости при его отсутствии.

## Результаты измерений вибрационных характеристик незадемпфированной пластины

Measurement results for vibration properties of non-damped plate

На начальном этапе работы определялись основные вибрационные характеристики пластины при отсутствии на ней акустического покрытия – значения резонансных частот колебаний толстолистовой пластины и ее шпации, а также коэффициента потерь колебательной энергии.

На рис. 2 приведен узкополосный ( $\Delta f = 1$  Гц) спектр входной вибровозбудимости пластины в точке № 8, который содержит большое число резонансных максимумов (кривая 1), в т.ч. на частотах 39, 69, 159, 178, 347, 369 Гц и на других более высоких частотах. В спектрах  $A/F$ , дБ, измеренных в точках № 2 и 5, помимо указанных были обнаружены максимумы на



**Рис. 2.** Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины в точке № 8 без покрытия (1) и с покрытием (2)

**Fig. 2.** Narrow-band spectra of input vibration excitability of plate at Point 8 without coating (1) and with it (2)

частотах 208, 262, 271 и 303 Гц. Измерениями пространственных распределений уровней вибрации по ширине шпации на частотах обнаруженных максимумов установлено, что возникновение максимумов с относительно невысокими уровнями вибрации на частотах 39, 69, 178 и 208 Гц обусловлено резонансными явлениями во всей пластине, а максимумы с более высокими уровнями на частотах 159, 262, 271 и 303 Гц связаны с резонансными изгибными колебаниями шпации с одной полуволной по ее ширине, как ранее отмечалось в работе [3].

Значения коэффициента потерь колебательной энергии в пластине определялись по формуле  $\eta = \Delta f_p / f_p$ , где  $\Delta f_p$  – ширина резонансного максимума в спектре входной вибровозбудимости на уровне –3 дБ от его наибольшей величины на резонансной частоте  $f_p$ . Установлено, что значения  $\eta$  уменьшаются с повышением частоты от средней величины  $8,5 \cdot 10^{-3}$  на низших резонансных частотах изгибных колебаний пластины и шпации до величин порядка  $(2-3) \cdot 10^{-3}$  на высоких частотах (952, 1163, 1405 Гц) исследуемого диапазона.

## Вибродемпфирующая эффективность покрытия

Vibration damping efficiency of coating

Рассмотрим влияние акустического покрытия на входную вибровозбудимость демпфируемой пластины и на уровни ее вибрации в других точках.

Типичные узкополосные ( $\Delta f = 1$  Гц) спектры входной вибровозбудимости  $A/F$ , дБ, пластины в диапазоне 20–1600 Гц, измеренные в точке № 8 при наличии (кривая 2) акустического покрытия, приведены на рис. 2. Видно, что установка покрытия на пластину привела к уменьшению уровней ее вибрации на резонансных частотах 347, 369 Гц и на бо-

лее высоких резонансных частотах на величину от 10 дБ и более (до 30 дБ). Средняя величина уменьшения уровней  $A/F$ , дБ, покрытием в точке № 8 по девяти наибольшим резонансным максимумам составила ~22 дБ. Уровни входной вибровозбудимости пластины в точке № 8 на низших резонансных частотах 39, 69, 159 и 178 Гц остались без изменения.

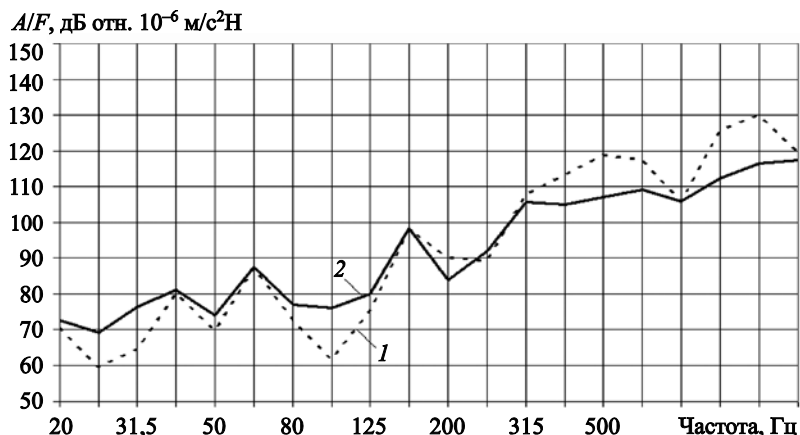
В то же время из рис. 2 видно, что установка покрытия привела к существенному увеличению уровней входной вибровозбудимости на нерезонансных частотах во всем частотном диапазоне измерений. Следствием этого явилось наличие в третьоктавных спектрах вибровозбудимости большого числа полос с отрицательным или нулевым влиянием покрытия на вибровозбудимость демпфируемой пластины. Соотношение третьоктавных уровней входной вибровозбудимости  $A/F$ , дБ, демпфируемой пластины в точке № 8 при отсутствии и наличии покрытия приведено на рис. 3.

Аналогичные результаты были получены в точках № 2 и 5.

Частотная зависимость разницы  $\Delta$ , дБ, третьоктавных уровней входной вибровозбудимости демпфируемой пластины в точке № 2 при наличии и отсутствии покрытия приведена на рис. 4. В частотной зависимости  $\Delta$ , дБ, как и ранее (рис. 3), имеется достаточно большое число третьоктавных полос с отрицательным или нулевым значением вибродемпфирующей эффективности покрытия. На том же рисунке точками изображены приведенные в работе [2] величины шумозаглушающей эффективности покрытия при установке на тонкую (6 мм) пластину, находящуюся в воде. В этом случае шумозаглушающая эффективность имеет существенно более широкий диапазон отрицательных значений в сравнении с результатами измерения вибродемпфирующей эффективности покрытия при его раз-

**Рис. 3.** Третьооктавные спектры входной вибровозбудимости пластины в точке № 8 без покрытия (1) и с покрытием (2)

**Fig. 3.** 1/3-octave spectra of input vibration excitability of plate at Point 8 without coating (1) and with it (2)



мещении на толстолистовой конструкции, находящейся в воздухе (расчетные значения частот  $f_{\min}$  и  $f_k$  при наличии покрытия на пластине толщиной 6 мм равняются 312 и 496 Гц соответственно).

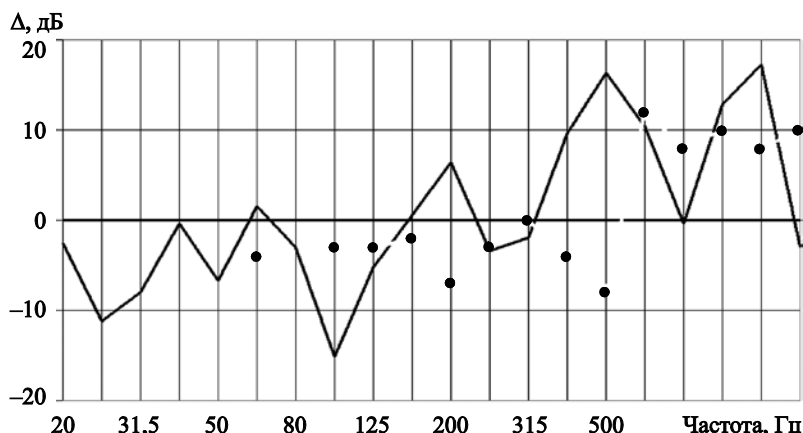
Примерно такие же качественные результаты по изменению уровней вибрации пластины покрытием были получены при ее последовательном воз-

буждении в точках № 1, 4 и 7, а также при измерении уровней переходной вибровозбудимости пластины в точках № 3, 6, 9 соответственно.

Типичные третьооктавные спектры переходной вибровозбудимости  $A/F$ , дБ, измеренной в точке № 3 при отсутствии (кривая 1) и наличии (кривая 2) покрытия, приведены на рис. 5. Установка покры-

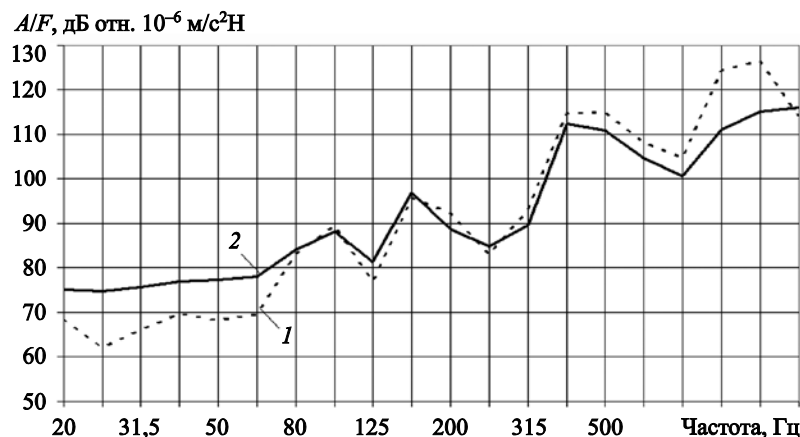
**Рис. 4.** Разница третьооктавных уровней вибровозбудимости пластины без покрытия и с покрытием в точке № 2. Точками обозначены значения шумозаглушающей эффективности покрытия на пластине толщиной 6 мм

**Fig. 4.** Difference in 1/3-octave vibration excitability levels for the plate with and without coating (Point 2). The dots indicate noise-damping efficiency of coating for 6 mm plate



**Рис. 5.** Третьооктавные спектры вибровозбудимости пластины в точке № 3 при возбуждении ее в точке № 1 без покрытия (1) и с покрытием (2)

**Fig. 5.** 1/3-octave vibration spectra at Point 3 of the plate excited at Point 1: without coating (1) and with it (2)



тия привела к уменьшению уровней вибрации, т.е. повысила вибропоглощающую способность демпфируемой шпации в диапазоне с полосами 315 Гц и выше в среднем на 4 дБ и повысила или не изменила уровни переходной вибровозбудимости пластины в более низкочастотных полосах. Такие же результаты по определению затухания распространяющихся по пластине колебаний при отсутствии и наличии покрытия были получены при измерении и уровней переходной вибровозбудимости пластины в точках № 6 и 9.

Выполненные измерения позволили также установить, что в диапазоне средних звуковых частот (262 Гц и выше) установка покрытия привела к существенному (до 11 раз) увеличению значений коэффициента потерь демпфируемой пластины. Например, на резонансной частоте колебаний шпации 468 Гц, близкой к расчетной частоте максимального демпфирования покрытия (491 Гц), значения  $\eta$  при отсутствии и наличии покрытия оказались равными  $4,3 \cdot 10^{-3}$  и  $4,9 \cdot 10^{-2}$ .

Измеренная величина  $\eta$  при наличии покрытия совпала с его ранее приведенной расчетной величиной. На более низких, чем 262 Гц, резонансных частотах установка покрытия на конструкцию значения коэффициента потерь практически не изменила. Например, на резонансных частотах 159 Гц при отсутствии и 156 Гц при наличии покрытия значения  $\eta$  оказались одинаковыми и равными 0,01.

## Заключение

### Conclusion

Таким образом, в результате исследований выявлены два следующих частотных диапазона различного влияния покрытия на входную вибровозбудимость толстолистовой конструкции:

- диапазон средних и высоких частот 262 Гц и выше, в котором его установка приводит к существенному уменьшению уровней резонансной вибрации в среднем на 18–22 дБ;
- низкочастотный диапазон с резонансными частотами 208 Гц и меньше, в котором наличие покрытия уровни резонансной вибрации либо не изменяет, либо даже несколько увеличивает и приводит к росту уровней вибрации на нерезонансных частотах и в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами до 200–250 Гц.

Наиболее вероятной причиной появления отрицательной вибродемпфирующей эффективности

покрытия является возникновение в его листах интенсивных резонансных колебаний и их негативное влияние на возникающие в системе колебательные процессы в демпфируемой пластине. Об этом косвенно свидетельствует, в частности, нахождение в соответствующем низкочастотном диапазоне расчетных резонансных частот всех типов упругих колебаний листа покрытия. Увеличение покрытием колебаний конструкции определяется отражениями упругих волн от его границ при малых потерях колебательной энергии. На аналогичное большее влияние отражений волн от границ амортизаторов в сравнении с их поглощением в амортизаторах на низшей резонансной частоте с отрицательной эффективностью указывалось в работе [4].

Очевидным техническим решением по устранению негативного влияния мягкого вибропоглощающего покрытия на вибрации демпфируемой конструкции, как и по недопущению его отрицательной вибропоглощающей эффективности в диапазоне низких частот, является увеличение потерь колебательной энергии и непосредственно в покрытии, и в демпфируемой конструкции. Последнее может быть обеспечено использованием дополнительных внутрикорпусных высокоэффективных средств вибропоглощения, например разработанных на основе полимерных пленок из поливинилацетата.

## Список использованной литературы

1. *Никифоров А.С.* Акустическое проектирование судовых конструкций. Справочник. Ленинград : Судостроение, 1990. 198, [1] с.
2. *Кузьмичев М.Н.* Зависимость шумозаглушающей эффективности конструкций с покрытиями от их звукоизолирующих и отражающих свойств // *Техническая акустика*. 1994. Т. 3, вып. 1–2. С. 14–17.
3. Экспериментальные исследования вибродемпфирования толстолистовой судовой конструкции / *Курпичников В.Ю., Гришин А.А., Савенко В.В., Смольников В.Ю.* // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. Вып. 1(403). С. 159–166. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-159-166.
4. *Клюкин И.И.* Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Судостроение, 1971. 415 с.

## References

1. *Nikiforov A.* Acoustic design of ship structures. Leningrad : Sudostroyeniye, 1990. 198 p. (in Russian).
2. *Kuzmichev M.* Noise damping efficiency of structures with acoustic coatings as function of their sound isola-

- tion and sound reflection properties // *Technical Acoustics*. 1994. Vol. 3, No. 1–2. P. 14–17 (*in Russian*).
3. Vibration damping of thick-plated ship structure: experimental studies / *V. Kirpichnikov, A. Grishin, V. Savenko, V. Smolnikov* // *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2023. Vol. 1(403). P. 159–166. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-159-166 (*in Russian*).
4. *I. Klyukin* Control of noise and acoustic vibrations in ships. 2<sup>nd</sup> edition, rev. and enl. Leningrad : Sudostroeniye, 1971. 416 p. (*in Russian*).

---

### Сведения об авторах

*Кирпичников Валерий Юлианович*, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-01. E-mail: sotnik26@bk.ru.

*Савенко Валентин Викторович*, к.т.н., ведущий научный сотрудник, заместитель начальника лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-49-85.

*Смольников Василий Юрьевич*, ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: krylov@ksrc.ru.

*Виноградов Андрей Владимирович*, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-49.

### About the authors

*Valery Yu. Kirpichnikov*, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-48-01. E-mail: sotnik26@bk.ru.

*Valentin V. Savenko*, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Laboratory – Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-49-85.

*Vasily Yu. Smolnikov*, Lead Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: krylov@ksrc.ru.

*Andrey V. Vinogradov*, Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-49.

Поступила / Received: 13.12.23  
Принята в печать / Accepted: 05.03.24  
© Коллектив авторов, 2024