

УДК 534.286+62-752
EDN: VUZPCE

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

УМЕНЬШЕНИЕ ВИБРАЦИИ ПОДКРЕПЛЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПОЛОСОВЫМ ВИБРОПОГЛОТИТЕЛЕМ

Объект и цель научной работы. Объектом является модель подкрепленной конструкции типового перекрытия судна. Цель исследований – уменьшение уровней низкочастотных резонансных максимумов вибрации перекрытия резонансным полосовым вибропоглотителем (РПВ).

Материалы и методы. Измерение уровней вибрации находящегося в воздухе и на поверхности воды перекрытия при отсутствии и наличии резонансного полосового вибропоглотителя. Сравнение уровней резонансных максимумов в спектрах вибрации при отсутствии и наличии РПВ.

Основные результаты. Получена информация о возможности уменьшения уровней низкочастотных резонансных максимумов вибрации подкрепленной конструкции малогабаритным средством вибродемпфирования.

Заключение. Приведенные результаты могут быть использованы при разработке малогабаритных и эффективных РПВ для уменьшения вибрации подкрепленных конструкций.

Ключевые слова: модель перекрытия, вибрации, низкочастотный резонансный максимум, резонансный полосовой вибропоглотитель, эффективность.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 534.286+62-752
EDN: VUZPCE

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

VIBRATION ATTENUATION OF STIFFENED STRUCTURE BY MEANS OF ANTI-VIBRATION STRAP

Object and purpose of research. This paper discusses typical stiffened structure of ship grillage. The purpose of the study was to attenuate low-frequency resonant peaks of grillage vibration by means of resonant anti-vibration strap.

Materials and methods. Vibration measurements on the grillage in air and on water surface, with and without the strap. Comparison of resonant peaks in vibration spectra with and without the strap.

Main results. The study has shown that low-frequency vibration peaks of stiffened structures can be attenuated by compact anti-vibration strap.

Conclusion. The results could be used in development of compact and efficient resonant anti-vibration straps for stiffened structures.

Keywords: grillage, vibration, low-frequency resonant peak, anti-vibration strap, efficiency.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Смольников В.Ю. Уменьшение вибрации подкрепленной конструкции полосовым вибропоглотителем. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 3(417): 122–128.

For citations: Kirpichnikov V.Yu., Savenko V.V., Smolnikov V.Yu. Vibration attenuation of stiffened structure by means of anti-vibration strap. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 3(417): 122–128 (in Russian).

Введение

Introduction

Создание и практическое применение малогабаритных и высокоэффективных, особенно на низких частотах, средств вибродемпфирования является одним из приоритетных направлений уменьшения уровней вибрации и шумоизлучения пластинчатых и оболочечных конструкций судов и других видов транспорта, а также оборудования различного функционального назначения.

Таковыми средствами являются, в частности, резонирующие (далее – резонансные) пластинчатые (полосовые) вибропоглотители (РПВ), которые представляют собой закрепленную с зазором на конструкции металлическую полосу (пластина, длина которой превышает ширину не менее чем в 2,5 раза), облицованную армированным вибропоглощающим покрытием (АВП) с диссипативным слоем в виде полимерной пленки из поливинилацетата. Указанный материал имеет наибольшие потери колебательной энергии в сравнении с другими существующими вибропоглощающими материалами [1].

Физической сутью работоспособности вибропоглотителя является интенсивное поглощение им колебательной энергии, поступающей от демпфируемой конструкции на резонансной частоте f_p при настройке на нее низшей резонансной частоты f_1 изгибных колебаний полосы вибропоглотителя.

Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие высокую эффективность уменьшения описанными РПВ уровней вибрации и шумоизлучения однородных (без подкреплений) пластин, содержатся, например, в работах [2, 3].

Однако в большинстве случаев инженерные конструкции имеют подкрепляющий, обычно перекрестный, набор, элементы которого оказывают определяющее влияние как на вибровозбудимость, так и на значения низших резонансных частот изгибных колебаний конструкций. Примером конструкций с повышенными во многих случаях уровнями их низкочастотной вибрации и шумоизлучения являются возбуждаемые гребными винтами днищевые перекрытия корпуса судов.

Снижение повышенных уровней вибрации обычно осуществляют облицовкой пластинчатых элементов перекрытий различного рода акустическими покрытиями. Однако эффективность уменьшения вибрации и шумоизлучения перекрытий в диапазоне низких частот существующими покры-

тиями, даже при их большой относительной массе, часто оказывается недостаточной.

Исследования уменьшения уровней низкочастотной вибрации и шумоизлучения подкрепленных перекрытий с помощью малогабаритных РПВ на основе полимерной пленки из поливинилацетата до настоящего времени не проводились.

Целью работы является экспериментальное определение эффективности виброгашения резонансным полосовым вибропоглотителем низкочастотных резонансных максимумов изгибных колебаний и шумоизлучения типового перекрытия при его нахождении в воздухе и на поверхности воды.

Описание перекрытия и резонансного полосового вибропоглотителя

Description of grillage and resonant anti-vibration strap

Фото макета с моделью перекрытия и установленным на него резонансным полосовым вибропоглотителем изображено на рис. 1.

Модель представляет собой пластину толщиной 4 мм с размерами в плане $1,59 \times 1,09$ м, подкрепленную перекрестным набором: пятью шпангоутами и пятнадцатью ребрами жесткости, ориентированными вдоль длинных и коротких кромок соответственно. Высота шпангоутов – $8 \cdot 10^{-2}$ м, ребер жесткости – $4 \cdot 10^{-2}$ м. Толщина элементов набора – 2 мм. Расстояние между шпангоутами составляет 0,16 м, а между ребрами жесткости – 0,1 м. По кромкам пластина с помощью болтов крепится

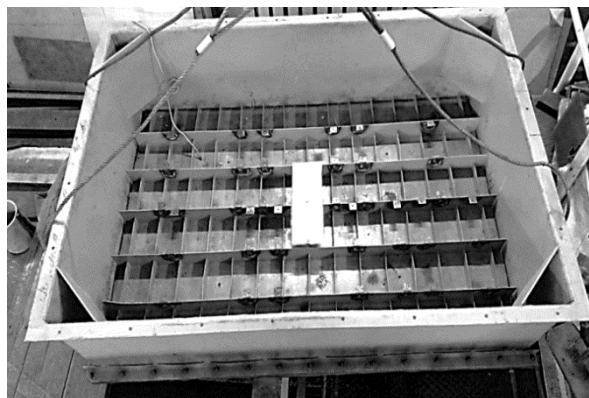


Рис. 1. Фото модели перекрытия с резонансным пластинчатым вибропоглотителем

Fig. 1. Photos of grillage model with resonant anti-vibration strap

к коробу прямоугольной формы, моделирующему участки соседних с перекрытием конструкций.

Испытанные РПВ содержали основную стальную полосу и установленное на нее армированное стальной полоской вибропоглощающее покрытие на основе полимерной пленки марки ВПС-2,5 толщиной 0,5 мм. (Другие размеры элементов испытанных РПВ указаны далее.)

Крепление основной полосы РПВ к модели перекрытия (далее пластина) осуществлялось к кромке среднего шпангоута над точкой пересечения с ребром жесткости. Геометрические центры (ГЦ) пластины и РПВ находились на одной линии, перпендикулярной их параллельным поверхностям.

Вибрационные характеристики пластины и резонансного полосового вибропоглотителя

Vibration characteristics of plate and resonant anti-vibration strap

Экспериментальные исследования вибрационных характеристик пластины выполнялись при ее нахождении в воздухе и на поверхности воды, а РПВ – только в воздухе.

Возбуждение ГЦ пластины сосредоточенной силой – условным аналогом динамического воздействия гребного винта на днищевое перекрытие судна через воду – осуществлялось с использованием вибромолотка с датчиком силы.

На рис. 2 приведены спектры входной вибровозбудимости пластины $A/F = 20 \lg(AF_0/\alpha_0 F)$, дБ (A , м/с^2 – уровень виброускорения в месте возбуждения силой F , Н; $\alpha_0 = 10^{-6} \text{ м/с}^2$ – пороговое значение виброускорения; $F_0 = 1$ Н), измеренной у среднего шпангоута, в зоне геометрического центра пластины при

ее нахождении в воздухе (кривая 1) и на поверхности воды (кривая 2).

В обоих частотных спектрах A/F имеются максимумы с повышенным уровнем. Расчетами и измерениями установлено, что частоты f_p первого низкочастотного максимума совпадают с низшей собственной (резонансной) частотой f_{11} с одной полуволной формы изгибных колебаний всей подкрепленной пластины в направлениях как длинных, так и коротких кромок. Значение частоты f_p пластины при ее нахождении в воздухе равняется 95,8 Гц, а на поверхности воды – 49,3 Гц.

Коэффициент потерь η колебательной энергии в пластине на указанных частотах, определенный по формуле $\Delta f_p/f_p$ (Δf_p – ширина резонансного максимума на уровне -3 дБ от его наибольшего значения), оказался практически одинаковым и равным примерно 0,014.

Для достижения наибольшей эффективности РПВ резонансная частота f_1 изгибных колебаний консольных участков его основной полосы расчетом настраивалась на каждое из приведенных значений частоты гасимого резонансного максимума.

Оценка толщины h , м, полосы, при которой $f_1 = f_p$, производилась с использованием формулы

$$f_1 = \alpha_1 \sqrt{\frac{B}{m\ell^4}}, \text{ где } \alpha_1 - \text{безразмерный коэффициент,}$$

зависящий от вида механического крепления полосы к демпфируемой конструкции (при одиночном жестком креплении, находящемся в ГЦ полосы, значение α_1 принималось равным 0,57); ℓ – кратчайшее расстояние между ГЦ и короткими кромками полосы; B и m – изгибная жесткость $Eh^3b/12$ и масса единицы длины ρhb полосы ($b \leq \ell/2,5$ – ширина, E и ρ – модуль Юнга и плотность материала).

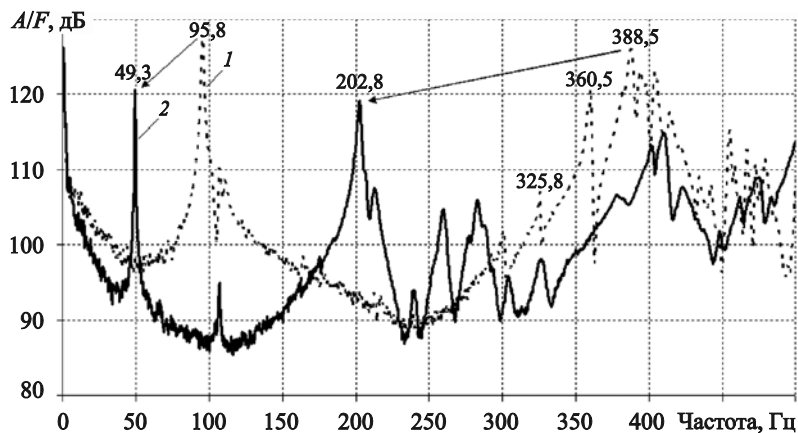


Рис. 2. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины в воздухе (1) и в воде (2)

Fig. 2. Narrow-band spectra of input vibro-excitability of plate in air (1) and in water (2)

При длине ℓ , равной расстоянию между шпангоутами (0,16 м), толщина $h = \frac{f_1 \ell^2 \sqrt{12}}{a_1 c_{пр}}$ ($c_{пр}$ – скорость продольных волн в стали, 5000 м/с) основной полосы вибропоглотителей для демпфирования пластины в воздухе оказалась равной $3 \cdot 10^{-3}$ м, а при ее нахождении на поверхности воды – $1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Значения низшей резонансной частоты f_1 и коэффициента потерь η_1 колебательной энергии в вибропоглотителях первой группы ($h = 3$ мм), отличающихся толщиной стальных элементов армирующего слоя АВП, определялись при установке РПВ на металлический диск диаметром 0,41 м и толщиной 40 мм. При возбуждении диска вибромолотом выполнены измерения частотного спектра переходной вибровозбудимости A/F , дБ, одной из коротких кромок основной полосы с размерами $0,32 \times 0,065 \times 3 \cdot 10^{-3}$ м каждого из пяти испытанных при нахождении демпфируемой пластины в воздухе вибропоглотителей с толщиной h_A армирующего слоя, равной 0,18, 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 мм.

Анализ измеренных спектров показал, что нанесение на основную полосу РПВ армированного вибропоглощающего покрытия приводит к следующим изменениям ее вибрационных характеристик:

- уменьшение частоты f_1 низшего резонансного максимума от 103,2 Гц при $h_A = 0,18$ мм до практически одинаковых (94–98 Гц), близких к f_p , значений f_1 при больших толщинах армирующего слоя АВП;
- последовательное снижение уровня резонансного максимума f_1 с ростом толщины h_A на величину до ~20 дБ при $h_A = 2,0$ мм;
- увеличение потерь колебательной энергии от значения коэффициента $\eta_1 = 0,01$ при отсут-

ствии АВП до мало отличающихся величин 0,08–0,11 при $0,5 \leq h_A \leq 2,0$ мм;

- появление при всех значениях толщины h_A дополнительного к $f_1 = f_p$, с меньшей частотой и уровнем, резонансного максимума, обусловленного с высокой вероятностью взаимодействием входящих в состав РПВ элементов между креплением и кромками (негативное влияние на вибрацию демпфируемой пластины колебаний РПВ на частоте дополнительного максимума не обнаружено).

Результаты измерений эффективности резонансного полосового вибропоглотителя

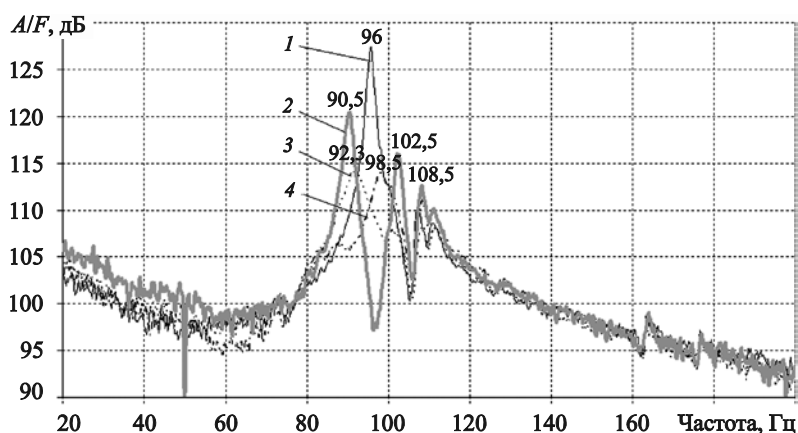
Measurement results: efficiency of resonant anti-vibration strap

Пластина в воздухе. На рис. 3 изображены узкополосные ($\Delta f = 1$ Гц) частотные спектры входной вибровозбудимости демпфируемой пластины при отсутствии (1) и наличии РПВ с размерами основной полосы $0,32 \times 0,065 \times 3 \cdot 10^{-3}$ м и толщиной h_A армирующего слоя находящегося на полосе вибропоглощающего покрытия, равной 0,18 мм (2), 0,5 мм (3) и 2,0 мм (4).

Обращаясь к рис. 3, видим, что при существенном (~30 дБ при $h_A = 0,18$ мм) уменьшении уровня гасимого резонансного максимума установка каждого РПВ привела к появлению в спектре A/F , дБ, не менее двух новых максимумов. Уровень наибольшего нового максимума, возникшего при установке РПВ, оказался меньше уровня гасимого максимума – условная эффективность $\mathcal{E}$, дБ, вибропоглотителя – на 7 дБ ($h_A = 0,18$ мм) и ~14 дБ при толщине армирующего слоя, равной 0,5 и 2,0 мм. Эффективность РПВ при толщинах, равных 1,0

Рис. 3. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины в воздухе без резонансного пластинчатого вибропоглотителя (1) и при его наличии ($0,32 \times 0,065 \times 3 \cdot 10^{-3}$ м) с толщиной армирующего слоя 0,18 мм (2), 0,5 мм (3) и 2 мм (4)

Fig. 3. Narrow-band spectra of input vibro-excitability of plate in air without anti-vibration strap (1) and with it (2): strap size $0.32 \times 0.065 \times 3 \cdot 10^{-3}$ m, reinforcing layer thickness 0.18 mm (2), 0.5 mm (3) and 2 mm (4)



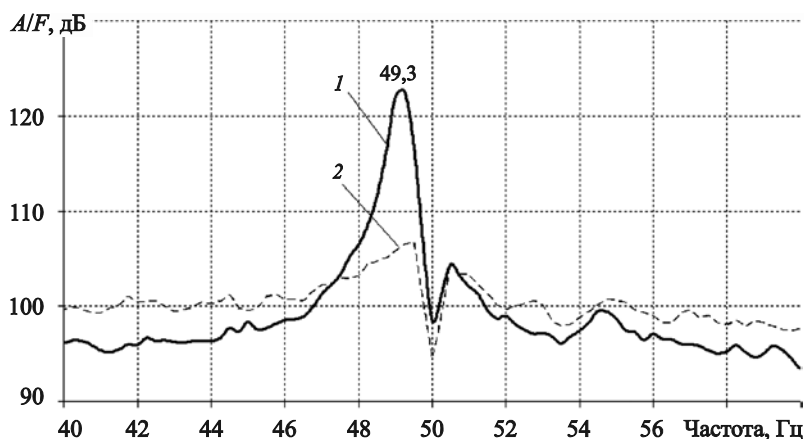


Рис. 4. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины на поверхности воды при отсутствии (1) и наличии (2) резонансного пластинчатого вибропоглотителя ($0,44 \times 0,09 \times 3 \cdot 10^{-3}$ м) с толщиной армирующего слоя 1 мм

Fig. 4. Narrow-band spectra of input vibro-excitability of plate on water surface without anti-vibration strap (1) and with it (2): strap size $0.44 \times 0.09 \times 3 \cdot 10^{-3}$ m, reinforcing layer thickness 1 mm

и 1,5 мм, составила 15 и 14 дБ. Значение коэффициента потерь η пластины с РПВ возросло до 0,025 и 0,057–0,076 при $h_A = 0,018$ мм и $h_A \geq 0,05$ мм соответственно.

Анализ третьоктавных спектров входной вибровозбудимости демпфируемой пластины при отсутствии и наличии РПВ показал уменьшение уровня A/F , дБ, в полосе 100 Гц, содержащей частоту резонансного максимума $f_p \approx 96$ Гц, на 5 дБ при $h_A = 0,18$ мм и 7–8 дБ при больших толщинах h_A .

Сделан вывод, что повышение толщины армирующего слоя покрытия h_A более $\sim 0,16$ толщины h_1 основной полосы РПВ и относительной массы более 0,8 % массы демпфируемой пластины к увеличению его эффективности практически не приводит.

Помимо описанных полосовых РПВ испытан частотно ненастроенный резонансный пластинчатый вибропоглотитель, имеющий размеры $\ell = 0,16$ м, $h_1 = 3$ мм, $h_A = 0,5$ мм и ширину $b = 0,12$ м, не удовлетворяющую условию $b \leq \ell/2,5$. При большей ($\mu \approx 1,4$ %) относительной массе его эффективность оказалась не лучше, чем у существенно более легкого ($\mu = 0,8$ %) частотно настроенного на f_p резонансного полосового вибропоглотителя с такими же размерами ℓ , h_1 и h_A .

Пластина на поверхности воды. Испытано два типа частотно настроенных РПВ – с ранее определенными геометрическими размерами полосы ($0,32 \times 0,065 \times 1,5 \cdot 10^{-3}$ м) и с полосой, имеющей толщину 3 мм и размеры в плане $2\ell = 0,44$ м и $b = 0,09$ м. Полоса первого была облицована покрытием с толщиной h_A армирующего слоя 1,5 мм, а второго – с толщиной h_A , равной 0,5 и 1,0 мм. Относительная масса вибропоглотителей состав-

ляла 0,65 % и примерно 1,6 % массы пластины. (Отношение массы РПВ к массе пластины с учетом соколеблющегося с ней слоя воды было меньше приведенных величин примерно в 3,8 раза.)

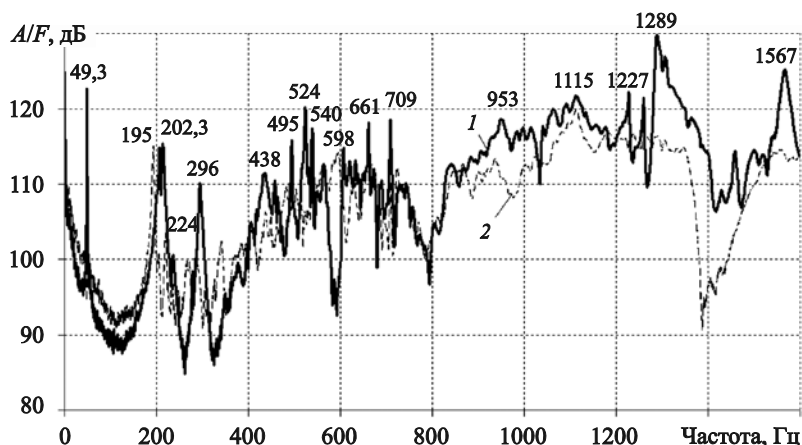
Установка на демпфируемую пластину одинакового РПВ с малой относительной массой уровня ее входной вибровозбудимости практически не изменила. Размещение над ним РПВ с такими же размерами привело к уменьшению уровня резонансного максимума на низшей резонансной частоте колебаний пластины лишь на 3 дБ.

Эффективность РПВ с размерами полосы ($0,44 \times 0,09 \times 3 \cdot 10^{-3}$ м) оказалась существенно большей (рис. 4). Установка вариантов РПВ на пластину привела к снижению уровня гасимого резонансного максимума (49,5 Гц) на 8 и 17 дБ при толщине армирующего слоя 0,5 и 1,0 мм соответственно. (Эффективность РПВ в третьоктавной полосе 50 Гц составила 5 и 12 дБ.) При этом меньшие уровни резонансной вибрации пластины при наличии на ней вибропоглотителя были зарегистрированы и на более высоких резонансных частотах.

В качестве примера на рис. 5 приведены узкополосные ($\Delta f = 1$ Гц) спектры входной вибровозбудимости пластины в частотном диапазоне до 1600 Гц при отсутствии (1) и наличии (2) РПВ с толщиной $h_A = 1,0$ мм. Эффективность вибропоглотителя величиной от 3 до 10 дБ наблюдается на большинстве частот резонансных колебаний пластины. Уменьшение уровней зарегистрировано на частотах резонансных колебаний не только всего перекрытия, но и его полей, а также ячеек – участков между соседними подкреплениями [4].

Рис. 5. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины на поверхности воды при отсутствии (1) и наличии (2) резонансного пластинчатого вибропоглотителя ($0,44 \times 0,09 \times 3 \cdot 10^{-3}$ м) с толщиной армирующего слоя 1 мм

Fig. 5. Narrow-band spectra of input vibro-excitability of plate on water surface without anti-vibration strap (1) and with it (2): strap size $0.44 \times 0.09 \times 3 \cdot 10^{-3}$ m, reinforcing layer thickness 1 mm



Заключение

Conclusion

К основным результатам работы отнесем следующие:

- впервые в отечественной практике показана возможность уменьшения уровней вибрации конструкции с перекрестным набором малогабаритными резонансными полосовыми вибропоглотителями, устанавливаемыми на подкрепляющий элемент;
- осуществлено существенное (14 дБ) уменьшение уровней низшего (~96 Гц) резонансного максимума изгибных колебаний находящейся в воздухе модели конструкции резонансным полосовым вибропоглотителем с относительной массой 0,8 %;
- зарегистрирована высокая эффективность вибропоглотителя с относительной массой 1,6 %, установка которого уменьшила уровни низшего резонансного максимума (49,3 Гц) модели конструкции при ее нахождении на поверхности воды на 17 дБ.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке малогабаритных средств вибродемпфирования, уменьшающих вибрации и шумоизлучение подкрепленных конструкций в широком частотном диапазоне, включающем их низшие резонансные частоты.

Список использованной литературы

1. Алексеев С.А., Сятковский А.И. Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. № 6. С. 45–46.
2. О низкочастотном вибродемпфировании пластины с большими потерями колебательной энергии / Кирпичников В.Ю., Кошечев А.П., Петров А.А., Савенко В.В. // Труды Крыловского государственного

научного центра. 2021. Вып. 1(395). С. 149–154. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-149-154.

3. Кирпичников В.Ю., Кошечев А.П., Кудяев А.В. Экспериментальные исследования эффективности полосового вибропоглотителя с одноточечным креплением // Noise theory and practice. 2023. Vol. 9, No. 1. P. 50–57.
4. Кирпичников В.Ю. Вибровозбудимость конструкций и пути ее уменьшения. Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2014. 220 с.

References

1. Alexeev S.A., Syatkovsky A.I. Damping parameters of polymeric films // Sudostroenie. 2015. No. 6. P. 45–46 (in Russian).
2. Low frequency vibration damping of a plate with high vibration losses / V.Yu. Kirpichnikov, A.P. Koscheyev, A.A. Petrov, V.V. Savenko // Transactions of Krylov State Research Centre. 2021. Vol. 1(395). P. 149–154. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-149-154 (in Russian).
3. Kirpichnikov V.Yu., Koscheyev A.P., Kudaev A.V. Experimental studies on efficiency of anti-vibration strap with single-point fastening // Noise theory and practice. 2023. Vol. 9, No. 1. P. 50–57 (in Russian).
4. Kirpichnikov V.Yu. Vibration excitability of structures and ways to attenuate it. St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2014. 220 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 ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург,

Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-49-85. E-mail:
ta.mah@yandex.ru.

Смольников Василий Юрьевич, ведущий инженер ФГУП
«Крыловский государственный научный центр». Адрес:
196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе,
д. 44. Тел.: +7 (812) 415-45-47. E-mail: krylov@ksrc.ru.

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.), Lead Researcher,
Deputy Head of Laboratory, Krylov State Research Centre.
Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia,
post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-49-85. E-mail:
ta.mah@yandex.ru.

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

Поступила / Received: 25.12.25

Принята в печать / Accepted: 27.07.26

© Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Смольников В.Ю., 2026