УДК 629.5.015.5
EDN: OUJTLV

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

МАЛОГАБАРИТНЫЕ СРЕДСТВА ВИБРОДЕМПФИРОВАНИЯ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПЛАСТИНЧАТОЙ КОНСТРУКЦИИ

Объект и цель научной работы. Объектом является толстолистовая судовая конструкция. Цель исследований – определение эффективности уменьшения уровней вибрации конструкции средствами вибропоглощения.
Материалы и методы. Измерение спектров вибрации конструкции без средств вибропоглощения и при их наличии.
Основные результаты. Получены величины эффективности армированных вибропоглощающих покрытий (АВП) и резонансных полосовых вибропоглотителей (РПВ).
Заключение. Показана возможность существенного уменьшения уровней низкочастотного резонансного максимума изгибных колебаний шпации конструкции частотно настроенными резонансными полосовыми вибропоглотителями с малой в сравнении с АВП массой, снижающими вибрацию конструкции только на более высоких резонансных частотах.
Ключевые слова: толстолистовая конструкция, вибрация, средства вибропоглощения, армированные вибропоглощающие покрытия, резонансные полосовые вибропоглотители, эффективность.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.5.015.5
EDN: OUJTLV

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

COMPACT VIBRATION DAMPERS FOR THICK PLATE STRUCTURES

Object and purpose of research. This paper discusses thick-plated ship structures. The purpose of the study was to determine the efficiency of vibration damping tools in the suppression of structural vibration levels.
Materials and methods. The structures with and without vibration damping tools were subject to their vibration spectrum measurements.
Main results. The study yielded efficiency parameters for reinforced anti-vibration coatings and resonant vibration-damping straps.
Conclusion. It is demonstrated that low-frequency resonance peaks of bending vibrations in structure spacings can be considerably reduced by means of frequency-tuned resonant vibration-damping straps. In comparison with anti-vibration coatings, these straps are lighter but their vibration damping effect is only present at higher resonance frequencies.
Keywords: thick-plated structure, vibration, damping tools, reinforced anti-vibration coatings, resonant anti-vibration straps, efficiency.
The authors declare no conflicts of interest.

Введение
Introduction

Одним из основных направлений улучшения условий жизнедеятельности обслуживающего персонала и пассажиров судов и других транспортных средств различного назначения является уменьшение уровней вибрации их корпусных и внутрикорпусных конструкций, а также уровней порождаемого вибрацией шума в помещениях и во внешних средах.

Наибольшие сложности при решении соответствующей технической задачи возникают при

Для цитирования: Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Смольников В.Ю. Малогабаритные средства вибродемпфирования толстолистовой пластинчатой конструкции. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 4(410): 186–192.
For citations: Kirpichnikov V.Yu., Savenko V.V., Smolnikov V.Yu. Compact vibration dampers for thick plate structures. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 4(410): 186–192 (in Russian).

Рис. 1. Толстолистовая пластинчатая конструкция

Fig. 1. Thick-plated structure

необходимости снижения уровней низкочастотных резонансных максимумов в спектрах вибрации и шумоизлучения толстолистовых пластинчатых конструкций, например корпусных конструкций ледоколов, которые подвергаются воздействию интенсивных динамических нагрузок при взламывании льда. Так, толщина ледового пояса ледокола «Лидер» (пр. 10510) достигает 80 мм.

Принципиальная возможность уменьшения вибрации толстолистовой пластинчатой конструкции (рис. 1) в широком диапазоне средних и высоких звуковых частот путем ее вибродемпфирования впервые в отечественной практике показана авторами работы [1]. Одна из шпаций стальной пластины толщиной 55 мм, подкрепленной ребрами жесткости, была облицована комплексным вибропоглощающим средством, состоящим из резонансных полосовых вибропоглотителей (РПВ) толщиной 4,5 мм и установленных на них двух армированных вибропоглощающих покрытий (АВП) общей толщиной 4,0 мм. В качестве диссипативного слоя в РПВ и АВП использована полимерная пленка марки ВПС-2,5 толщиной 0,5 мм из поливинилацетата. Коэффициент потерь пленок из поливинилацетата в диапазоне их рабочей температуры находится в пределах значений от 1 до 3 [2].

При относительной массе μ испытанного средства, составляющей ~1,7 % от массы конструкции, было достигнуто уменьшение уровней вибрации на величину от 6–8 дБ на резонансных частотах 262, 272, 303 и 338 Гц до среднего значения ~24 дБ на более высоких резонансных частотах.

На низшей резонансной частоте 158 Гц изгибных колебаний шпации и в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами, меньшими 250 Гц, уменьшение уровней вибрации демпфируемой конструкции испытанным средством не превышало обычной погрешности акустических измерений. Эффективность входящих в состав средства вибропоглотителей и покрытий при их отдельной установке в работе [1] не определялась.

Основными задачами настоящей работы являлись экспериментальное определение эффективности каждого из подобных малогабаритных средств вибродемпфирования толстолистовой пластинчатой конструкции (той же, что в работе [1]) и сопоставление измеренных значений эффективности этих средств с их расчетными величинами. В ходе исследования были также определены эффективности двух комплексных средств: состоящего из двух АВП и состоящего из РПВ при нахождении покрытий в соседней шпации конструкции.

Под эффективностью средств вибродемпфирования конструкции будем подразумевать уменьшение уровней ее вибрации в конкретной точке измерения при наличии средств в сравнении с соответствующими уровнями вибрации при их отсутствии.

Проведены измерения уровней входной (в точке возбуждения) и переходной (в других точках) вибровозбудимостей A/F, дБ, конструкции (далее – пластина) в диапазоне 0–1600 Гц при отсутствии и наличии на ней средств вибродемпфирования. Под вибровозбудимостью A/F, дБ, пластины подразумевается отношение уровней ее виброускорения A, м/с^2, к возбуждающей силе F, Н, равное величине $20\lg(AF_0/a_0F)$, где $F_0 = 1$ Н, a_0 – пороговый уровень виброускорения, 10^{-6}м/с^2.

Средства вибродемпфирования

Vibration damping tools

Определялась эффективность двух разновидностей тонких в сравнении с толщиной демпфируемой пластины армированных вибропоглощающих покрытий АВП1 и АВП2 и двух типов малогабаритных резонансных полосовых вибропоглотителей РПВ1 и РПВ2.

Оба АВП представляли собой задемпфированный лист из стали с размерами в плане 0,67×0,63 м и толщиной 3 мм (АВП1) и 5 мм (АВП2). Четыре листа каждого из покрытий и их совместной комбинации с размещением четырех листов АВП2 на металлических листах АВП1 последовательно устанавливались на неподкрепленной поверхности средней шпации демпфируемой пластины.

Основой обоих типов РПВ являлась стальная полоса, имеющая длину 0,33 м и толщину 4 мм. Полоса вибропоглотителей первого типа (РПВ1) имела ширину 0,1 м и крепилась к демпфируемой пластине с помощью полимерной пленки (размеры и способ крепления полосы к пластине были такими же, как в [1]). 12 вибропоглотителей этого типа размещались на месте установки каждого демонтированного листа испытанных вибропоглощающих покрытий АВП.

Низшая резонансная частота изгибных колебаний этих вибропоглотителей согласно расчету по формуле $f_1 = \frac{3,57}{\ell^2}\sqrt{\frac{D}{M}}$ равнялась ~190 Гц ($D = Eh^3\delta/12$, $M = \rho h\delta$ – изгибная жесткость и масса полосы соответственно; ℓ, δ и h – длина, ширина и толщина полосы; $\rho = 7800$ кг/м^3 – плотность стали; $E = 2,1\cdot10^{11}$ Па – модуль Юнга стали).

Экспериментальная настройка резонансных частот вибропоглотителей типа РПВ1 на резонансные частоты колебаний пластины не выполнялась.

Каждая полоса РПВ2 крепилась к демпфируемой пластине посредством приклеенных к коротким кромкам полосы опор шириной и толщиной 10 мм. Верхняя сторона полосы вибропоглотителей второго типа (РПВ2) шириной 0,05 м была облицована сначала одним (вариант 1), а затем, без демонтажа вибропоглотителей 1-го варианта, – двумя (вариант 2) АВП с толщиной армирующего слоя из стали 1,5 мм.

Схема размещения 24 вибропоглотителей 1-го варианта типа РПВ2 на демпфируемой пластине с комбинированным средством вибропоглощения в соседней шпации, состоящим из армированных покрытий АВП1 и АВП2, приведена на рис. 2. В средней части поверхностей каждого вибропоглотителя типа РПВ2 были приклеены два настроечных груза с массой каждого примерно 30 г, позволяющих менять низшую резонансную частоту изгибных колебаний.

В качестве диссипативного слоя всех испытанных средств использована самоклеящаяся полимерная пленка марки ВПС-2,5 из поливинилацетата толщиной 0,5 мм. (Диапазон температур работоспособности данной марки пленки – от 10 до 30 °С. Температура в лабораторном помещении мало отличалась от 20 °С.)

Масса армированных покрытий, а также вибропоглотителей составляла примерно: 4,3 % (АВП1), 7,2 % (АВП2), 5,8 % (РПВ1), 1,9 % (1-й вариант РПВ2) и 2,4 % (2-й вариант РПВ2) массы демпфируемой шпации пластины.

Результаты измерений

Measurement results

Типичные узкополосные ($\Delta f = 1$ Гц) спектры входной вибровозбудимости пластины посередине шпации (точка *2*) при отсутствии (кривая *1*) и наличии (кривая *2*) покрытия АВП1 приведены на рис. 3.

Обращаясь к рисунку, видим, что установка покрытия привела к существенному (более 6 дБ) уменьшению уровней большинства резонансных максимумов вибрации со значениями частот 262 Гц

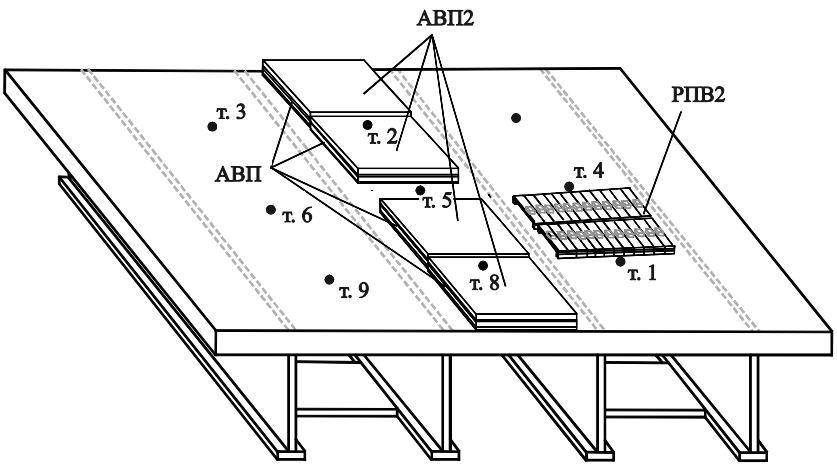

Рис. 2. Схема расположения на пластине комплексного средства из покрытий АВП1, АВП2, вибропоглотителей 1-го варианта типа РПВ2, а также точек возбуждения и измерения вибрации (точки 2 и 8 находятся на нижней поверхности пластины)

Fig. 2. Arrangement of vibration dampers on the plate (AVP1 and AVP2 anti-vibration tile and RPV2 (ver. 1) vibration-dampers) and layout of checkpoints for vibration excitation and measurement (points 2 and 8 are on the lower surface of the plate)

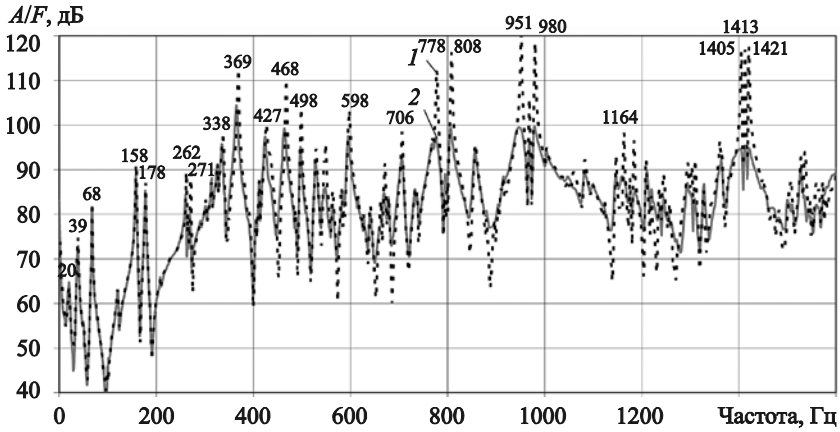

Рис. 3. Типичные узкополосные (Δf = 1 Гц) частотные спектры входной вибровозбудимости пластины (точка *2*) при отсутствии (кривая *1*) и наличии (кривая *2*) покрытия АВП1

Fig. 3. Typical narrowband (Δf = 1 Hz) frequency spectra of input vibration excitability of the plate (point *2*) without AVP1 coating (curve *1*) and with it (curve *2*)

и выше. Средняя величина уменьшения уровней *A*/*F*, дБ, 11 наиболее интенсивных, с уровнями больше 100 дБ, максимумов составила ~12 дБ. В диапазоне частот до 262 Гц с достаточно выраженными максимумами на резонансных частотах 158 и 178 Гц изгибных колебаний шпации уровни входной вибровозбудимости при установке покрытия АВП1 уменьшились на величину не более 3 дБ.

Такое же влияние покрытия АВП1 на узкополосные уровни *A*/*F*, дБ, было зарегистрировано и в двух других (*5* и *8*) точках измерения. Средняя по резонансным частотам с наибольшими уровнями входной вибровозбудимости величина его эффективности в точках *5* и *8* составила примерно 14 и 15 дБ соответственно.

Численные величины усредненной по точкам измерения и резонансным частотам с уровнями входной вибровозбудимости *A*/*F* > 100 дБ эффективности покрытий АВП1, АВП2 и комбинированного средства, состоящего из обоих армированных покрытий, оказались равными примерно 14, 17 и 23 дБ соответственно.

Расчетная оценка ожидаемой эффективности Э, дБ, уменьшения покрытиями и комбинированным средством уровней резонансных максимумов вибрации выполнялась с использованием приближенных формул:

$$Э = 6{,}5(\mu - 1) - 20\lg(\eta/\eta_0),\ \text{дБ, при } 1 \le \mu \le 4{,}5,$$

$$Э = 20\lg(\mu/4{,}5) - 20\lg(\eta/\eta_0) + 23,\ \text{дБ при } \mu \ge 4{,}5,$$

где μ – относительная масса АВП в % к массе шпации демпфируемой пластины; η – коэффициент потерь колебательной энергии в демпфируемой шпации до установки АВП, $\eta_0 = 3\cdot10^{-3}$.

Предлагаемые формулы позволяют удовлетворительно описывать результаты выполненных авторами многочисленных измерений [3] уменьшения уровней вибрации на резонансных частотах неподкрепленных металлических пластин при установке на них АВП на основе металлического листа и полимерной пленки из поливинилацетата.

С учетом относительной массы μ АВП1 (4,3 %), АВП2 (7,2 %) и комбинированного средства (11,5 %), а также средней по резонансным частотам с указанными уровнями максимумов величины коэффициента потерь колебательной энергии в шпации до ее демпфирования расчетные значения эффективности покрытий и средства в узких полосах частот равняются 15, 19 и 23 дБ соответственно и практически не отличаются от ранее приведенных измеренных величин.

На рис. 4 приведены частотные характеристики осредненной по всем точкам измерения эффективности АВП1 (кривая *1*), АВП2 (кривая *2*) и комбинированного средства (АВП1 + АВП2) в третьоктавных полосах частот. Обращаясь к рис. 4, видим, что эффективность покрытий и комбинированного средства в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами от 50 до 125 Гц и в полосе 200 Гц является низкой и мало отличающейся. В других частотных полосах эффективность АВП2 преимущественно больше эффективности АВП1, а эффективность комбинированного средства с АВП1 и АВП2 превышает эффективность АВП2. Средняя эффективность покрытий и комбинированного средства в третьоктавных полосах 160, 250, и 315 Гц равняется 4 дБ, а в более высокочастотном диапазоне составляет ~9 дБ. Максимальное значение эффективности, зарегистрированное в третьоктавной полосе 1 кГц, при демпфировании шпации комбинированным средством оказалось равным ~15 дБ.

Полученные эффективности армированных вибропоглощающих покрытий сопоставлялись с эф-

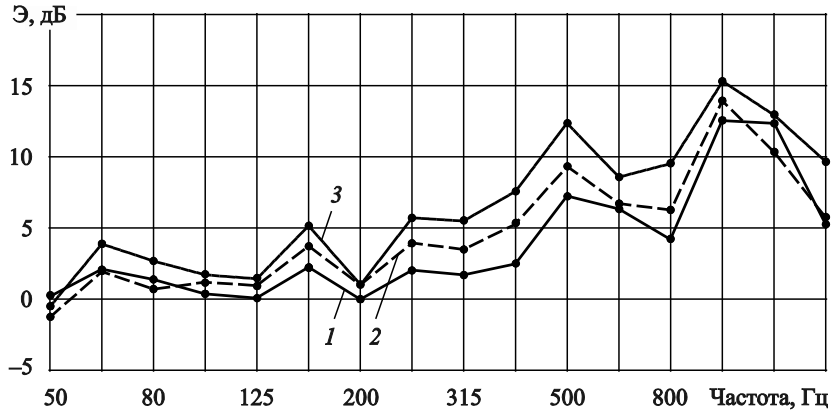

Рис. 4. Средние по точкам измерения значения эффективности АВП1 (кривая *1*), АВП2 (кривая *2*) и комбинированного АВП1 с АВП2 (кривая *3*) в третьоктавных полосах частот

Fig. 4. Average (by Points) measurement results for efficiency of AVP1 (curve *1*), AVP2 (curve *2*) and combination of AVP1 and AVP2 coatings (curve *3*) in 1/3-octave band

фективностью 48 резонансных полосовых вибропоглотителей типа РПВ1. Обратимся к рис. 5, на котором приведены средние по точкам измерения *2*, *5* и *8* величины эффективности на резонансных частотах изгибных колебаний шпации покрытия АВП1 (кривая *1*) и вибропоглотителей указанного типа (кривая *2*). Видим существенно большую в сравнении с покрытием АВП1 эффективность вибропоглотителей на некоторых резонансных частотах 262 Гц (6 дБ), 272 Гц (6 дБ), 369 Гц (6 дБ), 778 Гц (11 дБ), 808 Гц (12 дБ) и 1413 Гц (6 дБ).

Измерениями установлено, что три первые частоты примерно в 1,3 и 1,9 раза превышают низшую резонансную частоту (198 Гц) изгибных колебаний вибропоглотителей, а две последующие несколько меньше их третьей (828 Гц) резонансной частоты. Уровни резонансных максимумов на указанных частотах при наличии на поверхности шпации покрытия АВП2 и вибропоглотителей РПВ1 оказались примерно одинаковыми.

Дополнительная к средству, состоящему из двух покрытий, установка в соседнюю шпацию 24 существенно более легких вибропоглотителей первого варианта РПВ2 привела к уменьшению уровней входной вибровозбудимости пластины на низшей резонансной частоте 158 Гц изгибных колебаний шпации во всех трех точках измерения в среднем на ~8 дБ. Уровни максимумов *A*/*F*, дБ, на других резонансных частотах пластины при этом практически не изменились.

Примерно такое же, как указано, уменьшение уровней входной вибровозбудимости пластины вибропоглотителями на частоте 158 Гц было зарегистрировано и после демонтажа армированных вибропоглощающих покрытий. Все испытанные вибропоглотители 1-го варианта РПВ2 были одинаковыми и имели конструкцию, принятую для их изготовления после вибрационных испытаний одного из образцов, подтвердивших настройку низшей резонансной частоты $f_р$ его колебаний на низшую резонансную частоту 158 Гц колебаний шпации.

Измерения частоты $f_р$ всех стоящих на пластине вибропоглотителей 1-го типа РПВ2, проведенные при возбуждении пластины, показали, что в большинстве случаев ее значения существенно (до 16 Гц) отличаются от 158 Гц.

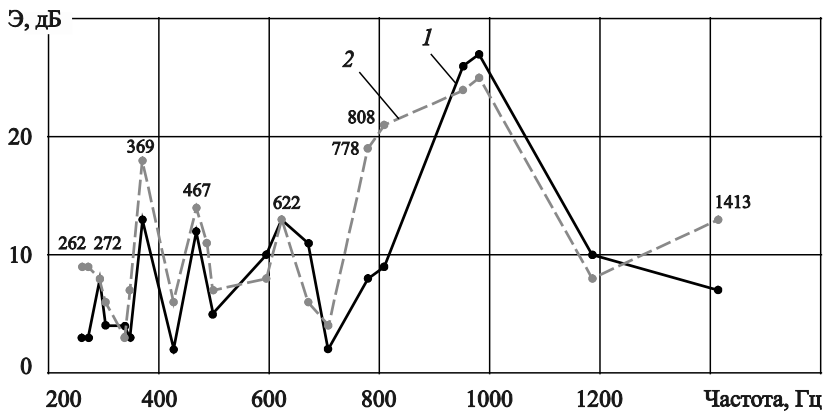

Рис. 5. Средние по точкам измерения значения эффективности АВП1 (кривая *1*) и РПВ1 (кривая *2*) на резонансных частотах колебаний пластины

Fig. 5. Average (by points) measurement results for efficiency of AVP1 (curve *1*) and RPV1 (curve *2*) at resonance frequency of plate vibrations

Величины коэффициента потерь $\eta_р$ колебательной энергии в указанных вибропоглотителях на их низшей резонансной частоте ($\eta_р = \Delta f_р / f_р$, где $\Delta f_р$ – ширина резонансного максимума на уровне –3 дБ от его наибольшего значения), оказались невысокими. Они находились в пределах от 0,02 до 0,04, т.е. мало отличались от значений коэффициента потерь колебательной энергии на резонансных частотах реальных инженерных конструкций и в среднем только в 3,5 раза превышали значения коэффициента потерь $\eta_р$ демпфируемой пластины при ее колебаниях на низших резонансных частотах (~$8{,}5 \cdot 10^{-3}$).

Для увеличения $\eta_р$ была разработана конструкция 2-го варианта вибропоглотителей РПВ2. Среднее значение ($\eta_р = 0{,}2$) коэффициента потерь $\eta_р$ трех испытанных вибропоглотителей 2-го типа РПВ2 с низшей резонансной частотой 158 Гц оказалось больше среднего значения коэффициента потерь $\eta_р$ первого варианта РПВ2 примерно в 7 раз.

С учетом ранее зарегистрированных значительных отличий частот $f_р$ конструктивно одинаковых вибропоглотителей первого варианта РПВ2 от частоты гасимого низшего резонансного максимума изгибных колебаний шпации была осуществлена (варьированием места расположения грузов) частотная настройка $f_р$ всех 24 стоящих на пластине вибропоглотителей 2-го варианта РПВ2 на частоту 158 Гц с точностью не хуже 2,0 Гц. Средняя по точкам измерения в пределах демпфируемой шпации величина их эффективности на частоте $f_р$ составила ~15 дБ.

Измерения уровней резонансного максимума на частоте 158 Гц в спектрах входной вибровозбудимости A/F, дБ, в точках, находящихся в пределах демпфируемой шпации, были выполнены при нахождении на ней не только 24 вибропоглотителей РПВ2 (2-й вариант), но и их меньшего числа (12, 8, 4, 2 и 1). Соответствующие экспериментальные значения их эффективности на указанной частоте приведены точками на рис. 6. Линией изображена расчетная зависимость эффективности вибропоглотителей от их количества на поверхности шпации. Вычисления выполнены с использованием приближенной формулы

$$Э = 20\lg\left(1 + \alpha \frac{M}{M_{шп}} \frac{\eta}{\eta_{шп}}\right), \text{ дБ},$$

где M − суммарная масса количества испытываемых вибропоглотителей; $M_{шп}$ − масса демпфируемой шпации (~940 кг); $\eta_{шп}$ – коэффициент потерь колебательной энергии в шпации на частоте 158 Гц

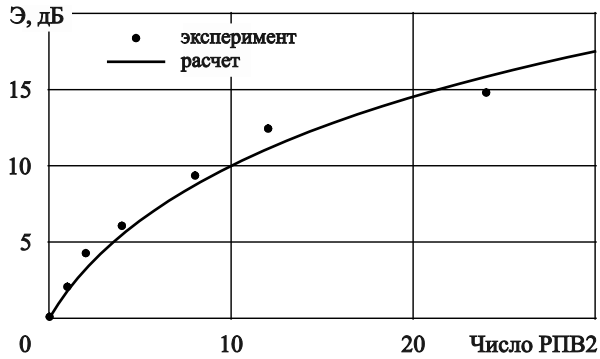

Рис. 6. Эффективность снижения входной вибровозбудимости пластины вибропоглотителями РПВ2 (2-й вариант)

Fig. 6. Reduction efficiency of input vibration excitability of the plate by RPV2 (ver. 2) vibration dampers

при отсутствии вибропоглотителей (0,012); η – коэффициент потерь колебательной энергии на низшей резонансной частоте вибропоглотителей (0,2); $\alpha = 13$ – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности испытанных РПВ и фактическое расположение опор вибропоглотителей вне пучности резонансной формы колебаний пластины (при ином конструктивном оформлении вибропоглотителей и отличающейся от рассмотренной схеме их крепления значение коэффициента α может быть другим).

Приведенные на рис. 6 расчетные величины эффективности вибропоглотителей отличаются от их измеренных значений не более чем на 1–2 дБ.

Заключение

Conclusion

К основным результатам работы отнесем следующие:

1. Впервые в отечественной практике получены значения эффективности малогабаритных армированных вибропоглощающих покрытий и резонансных полосовых вибропоглотителей при их отдельной и совместной установке на толстолистовую пластинчатую конструкцию.
2. Осуществлено существенное (15 дБ) уменьшение уровней низкочастотного резонансного максимума изгибных колебаний шпации конструкции частотно настроенными резонансными полосовыми вибропоглотителями с малой в сравнении с армированными вибропоглощающими покрытиями массой, снижающими вибрацию конструкции только на более высоких резонансных частотах.

3. Установлено, что для минимизации массы и достижения повышенной эффективности резонансных полосовых вибропоглотителей даже одинакового конструктивного оформления необходимо осуществлять настройку на частоту гасимого резонансного максимума вибрации, резонансной частоты каждого размещенного на конструкции вибропоглотителя с существенно большими (не менее чем в 20 раз) потерями колебательной энергии, чем в демпфируемой конструкции.

Содержащиеся в статье результаты могут быть использованы при разработке и практическом применении малогабаритных средств, предназначенных для эффективного уменьшения уровней вибрации толстолистовых пластинчатых конструкций судов и других видов транспорта в широком диапазоне, включая низшие резонансные частоты.

Список использованной литературы

1. Экспериментальные исследования вибродемпфирования толстолистовой судовой конструкции / *Кирпичников 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.
2. *Алексеев С.А., Сятковский А.И.* Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. № 6. С. 45–46.
3. *Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Сятковский А.И.* Влияние массовых параметров армированного вибропоглощающего покрытия на его эффективность // Труды Крыловского государственного научного центра. 2024. Вып. 1(407). С. 100–106.

References

1. Vibration damping of thick-plated ship structure: experimental studies / *V.Yu. Kirpichnikov, A.A. Grishin, V.V. Savenko, V.Yu. Smolnikov* // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023. Vol. 1(403). P. 159–166. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-159-166 (*in Russian*).
2. *Alexeev S.A., Syatkovsky A.I.* Damping parameters of polymeric films // Sudostroenie (Shipbuilding). 2015. No. 6. P. 45–47 (*in Russian*).
3. *Kirpichnikov V.Yu., Savenko V.V., Syatkovskiy A.I.* Weight vs efficiency of reinforced anti-vibration coating // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024. Vol. 1(407). P. 100–106 (*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.

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.

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: 07.08.24
Принята в печать / Accepted: 14.11.24
© Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Смольников В.Ю., 2024