

УДК 534.2
EDN: QZBDTO

В.Ю. Кирпичников¹, А.А. Петров²

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения (СПМБМ) «Малахит», Санкт-Петербург, Россия

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ПОЛОСОВОГО ВИБРОПОГЛОТИТЕЛЯ ВНЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

Объект и цель научной работы. Анализ резонансных частот изгибных колебаний полосового вибропоглотителя и их уровней на кромках при его кинематическом возбуждении вне геометрического центра.

Материалы и методы. Вычисления частотных спектров вибрации, форм и уровней колебаний на резонансных частотах при возбуждении гармоническим виброперемещением кромки отверстия в месте соединения вибропоглотителя с демпфируемой конструкцией.

Основные результаты. Установлены длины участков вибропоглотителя с различным влиянием на его вибрационные параметры.

Заключение. Определено соотношение длин участков, при котором упрощается настройка низшей резонансной частоты вибропоглотителя на частоту повышенной вибрации демпфируемой конструкции.

Ключевые слова: резонансный полосовой вибропоглотитель, вибрационные параметры, зависимость от соотношения длин участков.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 534.2
EDN: QZBDTO

V.Yu. Kirpichnikov¹, A.A. Petrov²

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² Malachite Design Bureau, St. Petersburg, Russia

KINEMATIC OFF-GEOMETRIC-CENTER EXCITATION OF RESONANCE-BAND VIBRATION ABSORBER

Object and purpose of research. Analysis of flexural vibrations at resonance frequencies of the band vibration absorber and their levels at edges under off-geometric-center excitation of the vibration absorber.

Materials and methods. Estimation of vibration frequency spectra, modes and levels at resonance frequencies under harmonic excitation of opening edges by vibratory displacement at a joint of the vibration absorber with the damped structure.

Main results. Lengths of the vibration absorber with different effect on its vibration parameters have been defined.

Conclusion. Proportions of vibration absorber lengths have been determined which simplifies tuning of the lowest resonance frequency of the absorber to the excessive vibration frequency of the damped structure.

Keywords: resonance-band vibration absorber, vibration parameters, relation regarding section lengths.

The authors declare no conflicts of interest.

Снижение уровней вибрации стержневых, пластинчатых и оболочечных конструкций – одно из основных направлений улучшения акустических характеристик современных транспортных средств.

Задачу широкополосного уменьшения уровней вибрации конструкций обычно решают облицовкой

их поверхности вибропоглощающими покрытиями. Они представляют собой одно- или многослойные структуры, в состав которых входят упругие материалы с внутренними потерями колебательной энергии [1]. Наибольшее практическое применение получили армированные вибропоглощающие покрытия (АВП),

Для цитирования: Кирпичников В.Ю., Петров А.А. Кинематическое возбуждение резонансного полосового вибропоглотителя вне геометрического центра. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 2(408): 116–121.

For citations: Kirpichnikov V.Yu., Petrov A.A. Kinematic off-geometric-center excitation of resonance-band vibration absorber. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 2(408): 116–121 (in Russian).

состоящие из диссипативного слоя упругого материала (например, резины) и армирующего слоя (как правило, в виде металлической пластины).

При изгибе конструкции в контактирующем с ее обшивкой диссипативном слое возникают колебательные процессы, и происходит поглощение вибрационной энергии в покрытии. АВП имеют широкую частотную полосу работоспособности, однако при обычно применяемых упругих материалах их эффективность на низших резонансных частотах колебаний демпфируемой конструкции оказывается малой даже при относительно большой массе, составляющей до 50 % от массы конструкции [2].

Существенно меньшие массу и толщину при большей эффективности на низких частотах имеют АВП с диссипативным слоем из полимерной пленки на основе поливинилацетата – рекордсмена по вибропоглощению среди существующих материалов [3]. При установке подобных АВП с толщиной в два и более раз меньшей толщины обшивки конструкции достигаются на низких частотах потери колебательной энергии с коэффициентом потерь η , равным $\sim 0,1$. Однако дальнейшее увеличение толщины как диссипативного, так и армирующего слоев АВП к заметному повышению значений η не приводит [4].

Вместе с тем при возбуждении конструкций, вызывающем появление в спектрах вибрации интенсивных резонансных максимумов, часто возникает необходимость более значительного уменьшения их уровней. Особенно актуальным соответствующее направление работ становится, когда отсутствует возможность уменьшения уровней подобных максимумов путем улучшения виброшумовых характеристик источника вибрации и (или) акустических свойств средств его виброизоляции.

В работах [4–6] показано, что в этих случаях целесообразнее использовать резонирующие (далее – резонансные) пластинчатые или полосовые вибропоглотители (РПВ), которые при меньших разме-

рах и массе, чем АВП, могут иметь большую эффективность.

Высокая эффективность РПВ достигается при облицовке одной или обеих поверхностей резонирующей пластины (полосы) армированным вибропоглощающим покрытием с диссипативным слоем в виде полимерной пленки на основе ранее указанного поливинилацетата при одновременной настройке низшей резонансной частоты изгибных колебаний пластины (полосы) на частоту интенсивного максимума в спектре вибрации демпфируемой конструкции. При этом эффективность РПВ на других частотах с повышенными уровнями вибрации конструкции оказывается меньшей.

Расширение низкочастотного диапазона высокой эффективности РПВ может быть достигнуто при настройке на частоты повышенной вибрации демпфируемой конструкции нескольких частот изгибных колебаний РПВ. Качественная реализация настройки РПВ на частоты гасимых резонансных максимумов изгибных колебаний демпфируемой конструкции и определение необходимости настройки на конкретные частоты невозможны без знания резонансных частот и форм колебаний РПВ при их возбуждении конструкцией. В работе [4] показано, что наибольшая эффективность вибропоглотителей реализуется при их изгибных колебаниях.

Целью настоящей работы являлось изучение отклика резонансного полосового вибропоглотителя на кинематическое возбуждение, производимое вне его геометрического центра.

На начальном этапе работы выполнялись вычисления и анализ частотных спектров вибрации, форм и уровней колебаний РПВ на резонансных частотах при возбуждении гармоническим виброперемещением ξ_0 кромки отверстия в месте соединения вибропоглотителя с условной демпфируемой конструкцией.

Геометрия задачи с размерами (в мм) резонансного полосового вибропоглотителя в плане приведена на рис. 1. Толщина стальной полосы вибропо-

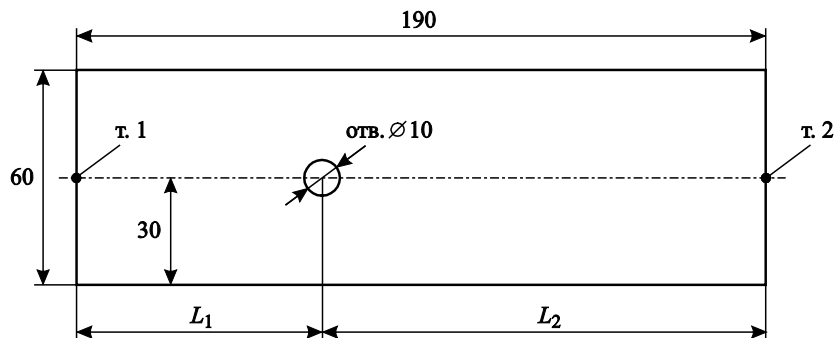


Рис. 1. Геометрия задачи
Fig. 1. Geometry of task

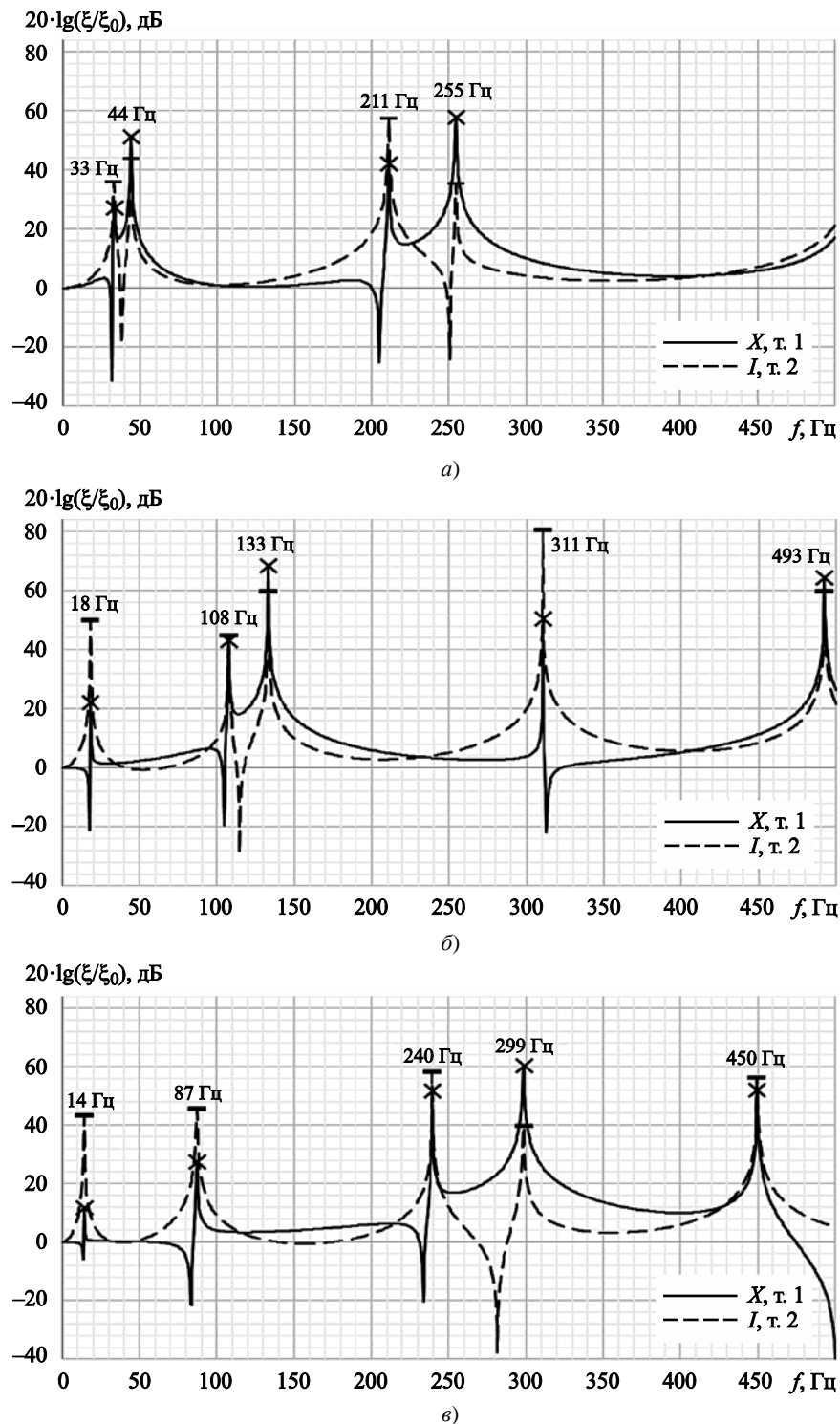
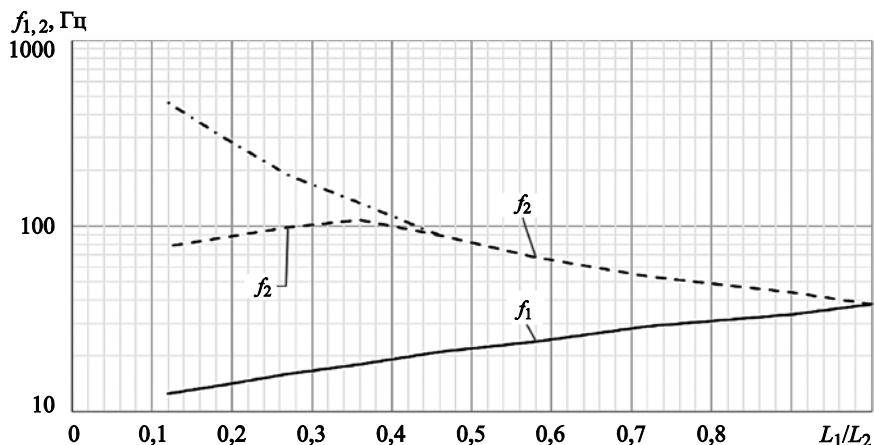


Рис. 2. Расчетные спектры виброперемещения коротких кромок резонансного полосового вибропоглотителя: а) $L_1 = 90$ мм, $L_2 = 100$ мм; б) $L_1 = 50$ мм, $L_2 = 140$ мм; в) $L_1 = 30$ мм, $L_2 = 160$ мм

Fig. 2. Calculated vibrodisplacement spectra for short edges of resonant damping strap: а) $L_1 = 90$ mm, $L_2 = 100$ mm; б) $L_1 = 50$ mm, $L_2 = 140$ mm; в) $L_1 = 30$ mm, $L_2 = 160$ mm

Рис. 3. Зависимость значения двух нижних резонансных частот изгибных колебаний полосы резонансного полосового вибропоглотителя от соотношения L_1/L_2

Fig. 3. Two lower resonance frequencies for bending vibrations of the damping strap as function of L_1/L_2 ratio



глотителя принята равной 0,56 мм. Считалось, что на всей поверхности полосы находится армированное вибропоглощающее покрытие с массой единицы поверхности $m = 1,95 \cdot 10^{-3}$ кг/м². Вычисления отклика $\xi_{1,2}$ коротких кромок полосы в точках 1 и 2, выраженного в дБ относительно приложенного воздействия $20 \lg(\xi_{1,2}/\xi_0)$, выполнялись для расстояний L_1 от геометрического центра (ГЦ) отверстия до середины одной из коротких кромок, равных 95, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30 и 20 мм. Для определения частот и относительных уровней резонансных максимумов виброперемещений кромок условно консольных участков полосы вносимые в нее армированным вибропоглощающим покрытием потери колебательной энергии считались малыми. Коэффициент потерь полосы принимался равным 10^{-4} .

При равном ($L_1 = L_2 = 95$ мм) расстоянии ГЦ отверстия от коротких кромок вибропоглотителя значения резонансных частот изгибных колебаний и уровни виброперемещений коротких кромок (здесь и далее в точках 1 и 2) участков полосы в соответствии с физическим смыслом задачи оказались одинаковыми. Значение их нижней резонансной частоты равнялось 38 Гц.

На рис. 2 приведены три пары типичных спектров виброперемещений коротких кромок полосы, соответствующие размерам его участков $L_1 = 90$ мм, $L_2 = 100$ мм (а); $L_1 = 50$ мм, $L_2 = 140$ мм (б) и $L_1 = 30$ мм, $L_2 = 160$ мм (в). Сплошной линией изображены спектры виброперемещений кромки короткого (точка 1), а пунктирной – кромки длинного (точка 2) участков. Обращаясь к рисунку, видим, что на каждой резонансной частоте колебаний РПВ возбуждаются оба его участка. При этом во всех случаях на первой резонансной частоте РПВ, являющейся нижней резонансной частотой длинного участка, уровень виброперемещения кромки (точ-

ка 2) этого участка превосходит уровень виброперемещения кромки (точка 1) короткого участка.

На частотах второго резонансного максимума уровни виброперемещения кромок длинного и короткого участков соотносятся в зависимости от их размеров по-разному. При длинах L_1 короткого участка равных 90 мм (рис. 2а), 80, 70 и 60 мм, уровень виброперемещения его кромки (точка 1) на частоте f_2 на 8–16 дБ больше соответствующего уровня перемещения кромки длинного участка (точка 2) вибропоглотителя. Значения второй резонансной частоты f_2 вибропоглотителя при указанных длинах короткого участка составляют 44, 54, 68 и 90 Гц соответственно.

На рис. 3 изображена зависимость значения двух нижних резонансных частот изгибных колебаний полосы РПВ от соотношения длин ее участков L_1/L_2 . Рост значения f_2 наблюдается до длины примерно 50 мм короткого участка, мало отличающейся от размера его ширины (60 мм). Уровни виброперемещения кромок (точки 1 и 2) вибропоглотителя при $L_1 = 50$ мм (рис. 2б) оказываются на частоте $f_2 = 108$ Гц практически одинаковыми и на 4–8 дБ меньшими, чем при больших значениях L_1 . Короткий участок перестает колебаться на его нижней резонансной частоте – второй резонансной частоте вибропоглотителя – как полоса и начинает вести себя подобно пластине.

Сказанное подтверждают формы колебаний нижних резонансных частот вибропоглотителя при его размерах $L_1 = 90$ мм, $L_2 = 100$ мм (рис. 4а, см. вклейку) и $L_1 = 30$ мм, $L_2 = 160$ мм (рис. 4б, см. вклейку). При меньших, чем 50 мм, значениях длины L_1 короткого участка РПВ незначительно изменяющиеся уровни виброперемещения кромки его длинного участка (точка 2) существенно превосходят на частоте f_2 уровни виброперемещения кромки

короткого участка (точка 1). Значение f_2 , равное 108 Гц при $L_1 = 50$ мм, является при меньших размерах L_1 значением второй резонансной частоты изгибных колебаний длинного участка полосы и уменьшается со снижением размера L_1 до значения $f_2 = 78$ Гц при $L_1 = 20$ мм (рис. 3).

Более интенсивные колебания кромки короткого участка (точка 1) при его длинах 40, 30 и 20 мм в сравнении с кромкой длинного участка (точка 2) возникают на резонансных частотах 188, 299 Гц (рис. 2в) и 461 Гц соответственно (штрихпунктирная кривая на рис. 3). Именно на этих частотах в пластинчатом элементе короткого участка возникают собственные резонансные колебания с повышенными уровнями виброперемещения его кромки. Влияние изгибных колебаний полосы длинного участка вибропоглотителя на свободную кромку короткого участка оказывается на соответствующих частотах существенно меньшим, чем на более низких резонансных частотах вибропоглотителя, например на частоте 240 Гц в спектрах на рис. 2в ($L_1 = 30$ мм, $L_2 = 160$ мм). На ней и на других подобных частотах с иной длиной короткого участка в нем возникают виброперемещения, возможно, с поворотными формами изгибных колебаний.

С учетом полученных значений резонансных частот колебаний рассмотренных вариантов полосы вибропоглотителя и возможности достижения в нем больших потерь энергии при облицовке полосы армированным вибропоглощающим покрытием был сделан вывод о целесообразном использовании для низкочастотного виброгашения конструкций вариантов РПВ с размерами в плане $L_1 = 90$ мм, $L_2 = 100$ мм и $L_1 = 80$ мм, $L_2 = 110$ мм и отношением их длины L_1/L_2 , равным 0,9 и 0,73 соответственно. Расчетные значения низшей резонансной частоты изгибных колебаний участков этих РПВ отличаются незначительно. На этом основании можно ожидать, что РПВ будет иметь в спектрах его вибровозбудимости практически единый широкополосный низкочастотный резонансный максимум. Наличие такого максимума облегчит настройку РПВ на низшую частоту интенсивной вибрации демпфируемой конструкции.

Выполнялось экспериментальное определение вибрационных параметров стальной полосы толщиной 0,56 мм и РПВ на ее основе с размерами в плане 190×60 мм при длине их участков $L_1 = 90$ мм и $L_2 = 100$ мм. Покрытие состояло из полимерной пленки типа ВПС-2,5 толщиной 0,5 мм на основе поливинилацетата и стального армирующего слоя толщиной 0,25 мм. Площадь покрытия

составляла примерно 85 % площади стальной полосы. (Участки полосы у крепления и у ее коротких кромок покрытием не облицовывались). Эксперимент проводился с использованием электродинамического вибратора RFT. Крепление полосы к имеющей резьбу головке (штоку) вибратора до и после облицовки ее армированным покрытием осуществлялось с помощью двух гаек. Измерения вибрации проводились с использованием миниатюрного вибродатчика, устанавливаемого на торце головки (штока) вибратора и непосредственно у коротких кромок полосы (точки 1 и 2 на рис. 1).

Частотный спектр вибрации (виброускорения в дБ относительно порогового уровня 10^{-6} м/с²) головки (штока) вибратора – возбуждающего сигнала – приведен кривой 1 на рис. 5 (см. вклейку). Кривыми 2 и 3 на том же рисунке изображены спектры вибрации, измеренные в точках 1 и 2 непосредственно у коротких кромок необлицованной полосы.

Сравнивая значения низших резонансных частот участков полосы в этих и в ранее приведенных расчетных спектрах относительных виброперемещений ее кромок в точках 1 и 2 (рис. 2а), видим их некоторую неодинаковость. Отличие экспериментальных значений резонансных частот в спектрах вибрации каждой кромки от их расчетных значений обусловлено отсутствием на полосе распределенной массы вибропоглощающего покрытия, а также неизбежным влиянием на экспериментальные данные ряда физических факторов, не учитываемых при выполнении расчета.

К основным можно отнести, например, особенности способа крепления полосы к вибратору и связанную с этим неодинаковость кинематического вибровозбуждения полосы при проведении расчетов и измерений, неодинаковость (гармонический и широкополосный характеры) вибровозбуждения полосы, различное расположение точек контроля вибрации – на кромке (вычисления) и у кромки (эксперимент), неучтенное при вычислениях влияние на вибрации полосы массы гаек крепления и миниатюрного виброприемника.

Спектры вибрации коротких кромок облицованной АВП полосы вибропоглотителя приведены на рис. 6 (см. вклейку). В каждом из спектров четко выражен лишь один низкочастотный максимум вибрации с мало отличающимися частотами у короткого (точка 1, 50 Гц) и длинного (точка 2, 48 Гц) участков вибропоглотителя, что облегчает его настройку на близкую к этим значениям низшую резонансную частоту интенсивной вибрации демпфируемых конструкций.

Отсутствие в спектрах вибрации коротких краев РПВ более высокочастотных резонансных максимумов позволяет предположить о возможности достижения повышенной эффективности РПВ и на более высоких резонансных частотах демпфируемых конструкций. Для достижения наибольшей высокочастотной эффективности вибропоглотителя, при некотором ухудшении качества его настройки на низкую резонансную частоту повышенной вибрации конструкций, продольный размер L_1 короткого участка вибропоглотителя должен быть соизмерим с шириной вибропоглотителя.

Содержащиеся в работе результаты могут быть использованы при выборе размеров резонансных полосовых вибропоглотителей для эффективного широкополосного, включая низкие частоты, виброгашения резонансных максимумов в спектрах вибрации корпусных и внутрикорпусных конструкций транспортных средств различного функционального назначения.

Список использованной литературы

1. *Никифоров А.С.* Акустическое проектирование судовых конструкций. Справочник. Ленинград : Судостроение, 1990. 198, [1] с.
2. *Ионов А.В.* Средства снижения вибрации и шума на судах. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2000. 349 с.
3. *Алексеев С.А., Сятковский А.И.* Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. № 6. С. 45–46.
4. *Кирпичников В.Ю.* Вред и польза резонансных явлений в элементах судовых конструкций. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2019. 174, [1] с.
5. *Кирпичников В.Ю., Сятковский А.И., Шлемов Ю.Ф.* Высокоэффективные средства низкочастотного вибродемпфирования с упругим элементом из полимерной пленки // Судостроение. 2020. Вып. 1. С. 44–47.
6. О низкочастотном вибродемпфировании пластины с большими потерями колебательной энергии / *В.Ю. Кирпичников, А.П. Коцеев, А.А. Петров, В.В. Савенко* // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. Вып. 1(395). С. 149–154. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-149-154.

References

1. *Nikiforov A.* Acoustic design of ship structures. Leningrad : Sudostroyeniye, 1990. 198 p. (in Russian).
2. *Ionov A.* Noise and vibration damping tools for ships. St. Petersburg : Krylov Central Research Institute, 2000. 349 p. (in Russian).
3. *Alexeev S., Syatkovsky A.* Damping parameters of polymeric films // Sudostroyeniye. 2015. No. 6. P. 45–46 (in Russian).
4. *Kirpichnikov V.* Structural resonances aboard ship: pros and cons. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2019. 174 p. (in Russian).
5. *Kirpichnikov V.Yu., Syatkovsky A.I., Shlemov Yu.F.* Highly efficient low-frequency vibration damping with an elastic polymer-film element // Sudostroyeniye. 2020. Vol. 1. P. 44–47 (in Russian).
6. Low frequency vibration damping of a plate with high vibration losses / *V. Kirpichnikov, A. Koscheev, A. Petrov, 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).

Сведения об авторах

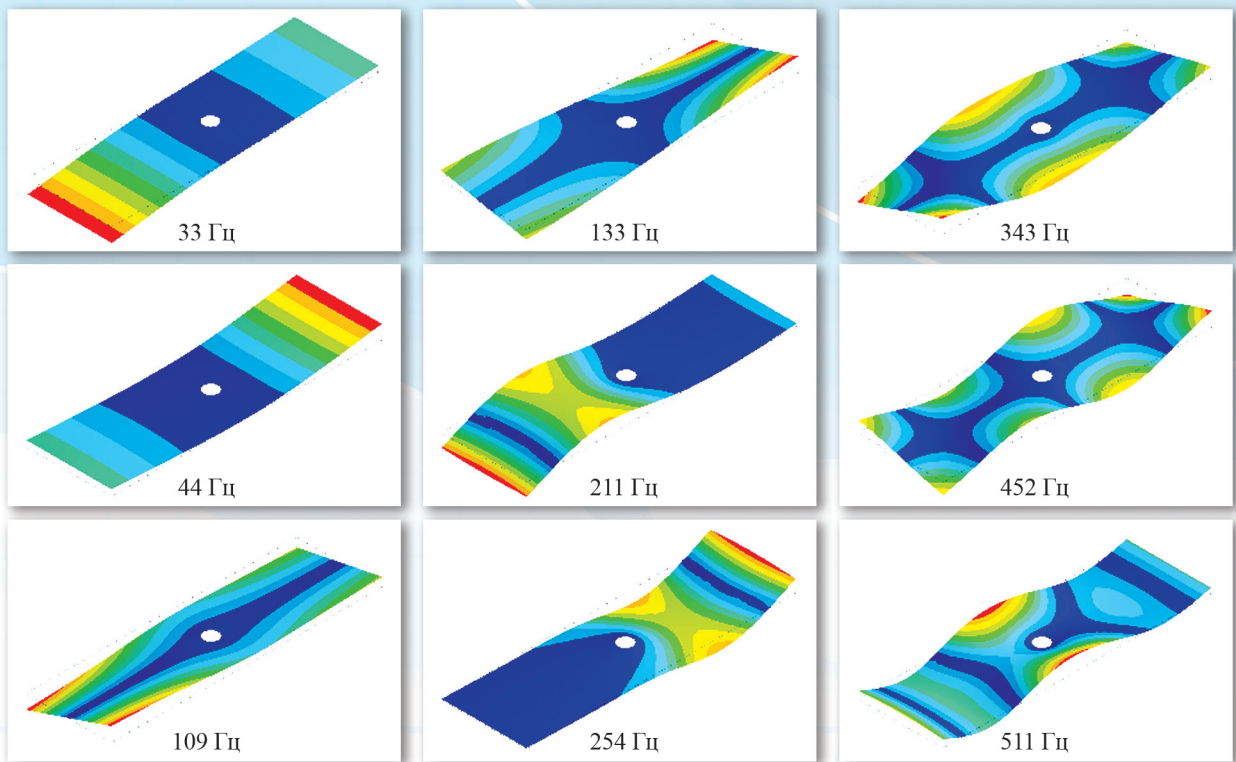
Кирпичников Валерий Юлианович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-01. E-mail: sotnik26@bk.ru.

Петров Александр Александрович, к.-ф.-м.н., ведущий инженер АО «Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит». Адрес: 196135, Россия, Санкт-Петербург, ул. Фрунзе, д. 18. Тел.: +7 (812) 242-15-76. E-mail: ptrvc@mail.ru.

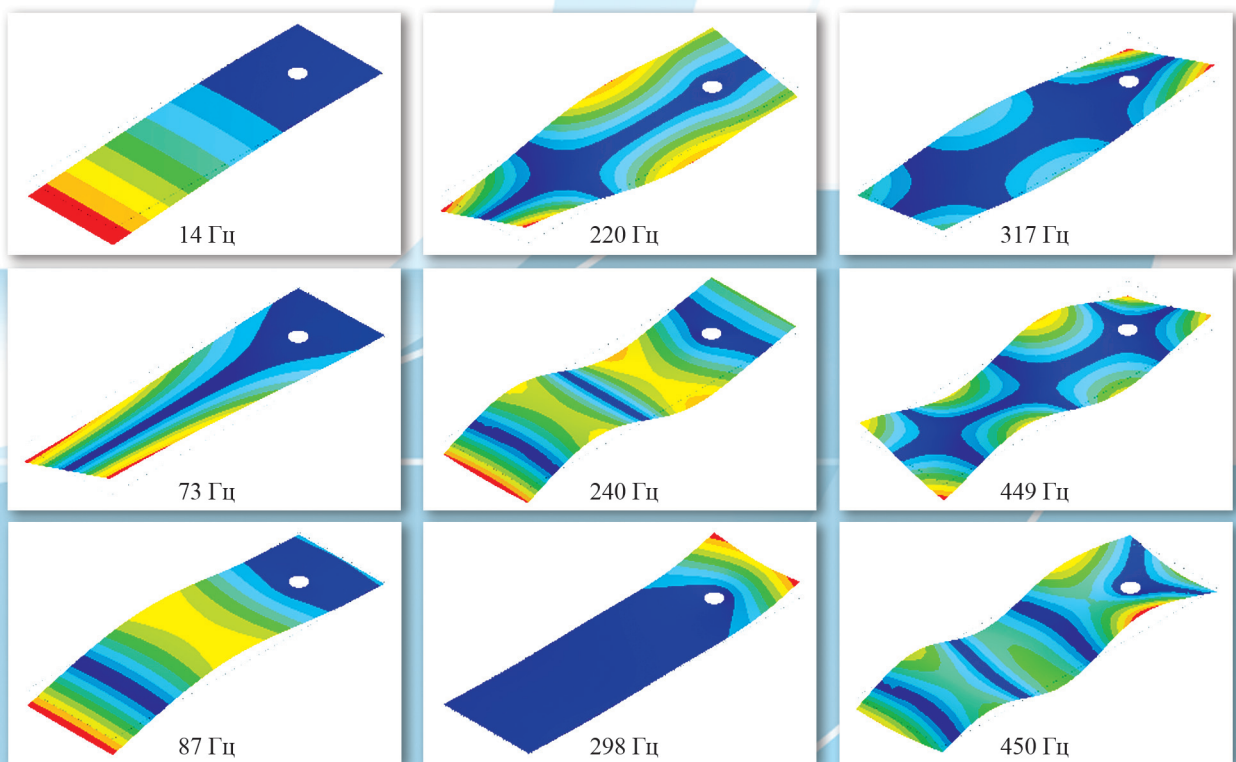
About the authors

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.

Alexandr A. Petrov, Cand. Sci. (Phys. & Math.), Lead Engineer, Malachite Design Bureau. Address: 18, Frunze st., St. Petersburg, Russia, post code 196135. Tel.: +7 (812) 242-15-76. E-mail: ptrvc@mail.ru.



a)



b)

Рис. 4. Формы и резонансные частоты колебаний полосы вибропоглотителя:
 а) $L_1 = 90$ мм, $L_2 = 100$ мм; б) $L_1 = 30$ мм, $L_2 = 160$ мм

Fig. 4. Vibration modes and resonance frequencies of damping strap with а) $L_1 = 90$ mm, $L_2 = 100$ mm; б) $L_1 = 30$ mm, $L_2 = 160$ mm

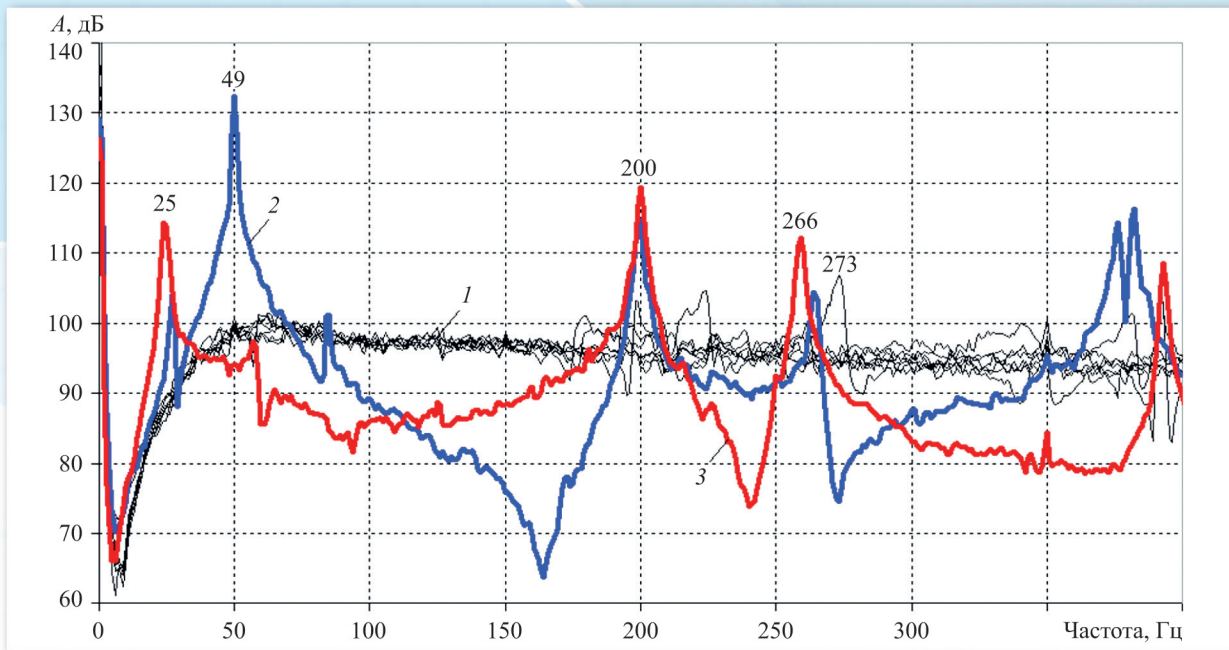


Рис. 5. Спектры вибрации головки (штока) вибратора (кривая 1) и концов участков (кривые 2 и 3) необлицованной полосы

Fig. 5. Vibration spectra for vibrator head (stock) – Curve 1, and for the ends (Curves 2 and 3) of the strap without coating

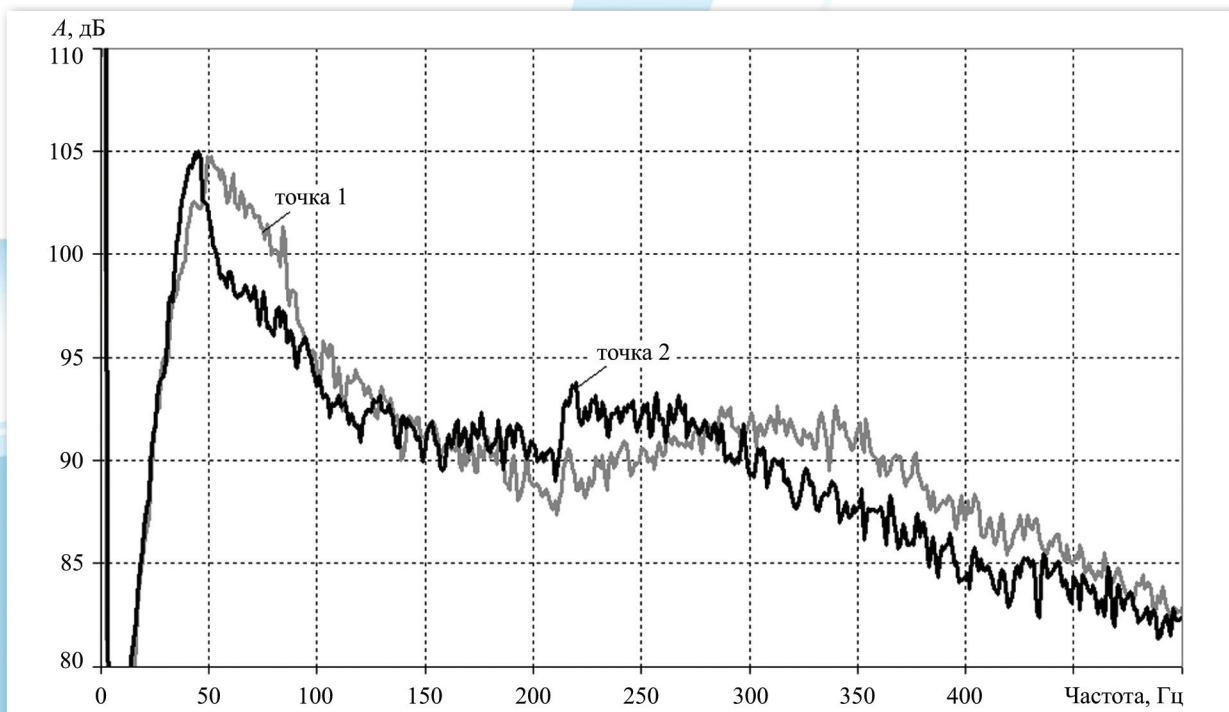


Рис. 6. Спектры вибрации концов участков облицованной армированным вибропоглощающим покрытием полосы вибропоглотителя

Fig. 6. Vibration spectra for the ends of the vibration damping straps with reinforced anti-vibration coating