

УДК: 628.517.4. 699.842
OECD: 2.03 PU

О влиянии длины полосового вибропоглотителя на его эффективность

Кирпичников В.Ю.¹, Смольников В.Ю.², Олейников А.Ю.^{3*}

¹Д.т.н., профессор,

²Инженер 1-ой категории, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,

³К.т.н., доцент,

^{1,3}Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова,

^{1,2,3}г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Выполнены экспериментальные исследования вибровозбудимости двух демпфированных пластин из стали. Демпфирование обеих пластин осуществлялось установкой на одну из их поверхностей вариантов вибропоглотителя в виде стальной полосы, облицованной полимерной пленкой из поливинилацетата. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование влияния длины резонансного полосового вибропоглотителя на его эффективность при размещении на пластинах с размерами и диссипативными характеристиками, типичными для участков (ячеек) различного рода инженерных конструкций, находящихся между их соседними подкрепляющими элементами. Измерялись уровни входной вибровозбудимости пластин в их геометрическом центре. Были получены значения эффективности уменьшения вибрации пластин группами резонансных полосовых вибропоглотителей (РПВ), имеющих одинаковую ширину и различную длину в составе каждой группы, а также массу от 0,8 до ~10% массы пластины. Установлено явление уменьшения эффективности при увеличении длины вибропоглотителя в сравнении с его оценочным продольным размером l , при котором выполняется условие настройки на частоту гасимого резонансного максимума.

Ключевые слова: пластина, вибрация, полосовой вибропоглотитель, эффективность, резонансные полосовые вибропоглотители, вибродемпфирование

The influence of the length of a strip vibration absorber on its efficiency

Kirpichnikov V.Yu.¹, Smolnikov V.Yu.², Oleinikov A.Yu.^{3*}

¹DSc, Professor,

²1st category engineer, Federal State Unitary Enterprise 'Krylovsky State Scientific Center',

³PhD, Associate Professor,

^{1,3}Baltic State Technical University 'VOENMEH',

^{1,2,3}St. Petersburg, Russia

Abstract

Experimental studies of vibration excitability of two damped steel plates were performed. Damping of both plates was performed by installing on one of their surfaces a vibration absorber variant in the form of a steel strip covered with a polymer film made of polyvinyl acetate. The objective of this work was to experimentally study the influence of length of a resonant strip vibration absorber on its efficiency when placed on plates with

*E-mail: alexey.ole@gmail.com (Олейников А.Ю.)

dimensions and dissipative characteristics typical for sections (cells) of various types of engineering structures located between their adjacent reinforcing elements. The levels of input vibration excitability of the plates were measured in their geometric center. The values of the efficiency of reducing plate vibration by resonance strip vibration absorbers RSVA groups of the same width and different lengths in each group, as well as a mass from 0.8 to $\sim 10\%$ of the plate mass were obtained. The phenomenon of efficiency decrease with increasing length of the vibration absorber in comparison with its estimated longitudinal size l , at which the condition of tuning to the frequency of the damped resonant maximum is fulfilled, is established.

Keywords: plate, vibration, band-pass vibration absorber, efficiency, resonant band-pass vibration absorbers, vibration damping

Введение

Создание и практическое применение малогабаритных и высокоэффективных средств вибродемпфирования является одним из приоритетных направлений снижения уровней вибрации и шумоизлучения пластинчатых и оболочечных конструкций транспортных средств и оборудования различного функционального назначения.

Одним из таких средств являются резонирующие (далее – резонансные) полосовые вибропоглотители (далее – РПВ), содержащие диссипативный слой полимерной пленки из поливинилацетата, имеющего наибольшие потери колебательной энергии среди существующих вибропоглощающих материалов [1, 2, 3, 4, 5]. Самоклеющаяся полимерная пленка разновидности таких РПВ наносится одной стороной на металлическую полосу, а другой приклеивается к демпфирующей конструкции.

Для достижения наибольшей эффективности подобного вибропоглотителя низшую резонансную частоту f_1 его колебаний настраивают на частоту f_p гасимого резонансного максимума изгибных колебаний демпфируемой конструкции.

При выполнении условия, что длина РПВ l превышает его ширину b более чем в 2,5 раза, оценочное значение частоты f_1 определяют, обычно пренебрегая влиянием полимерной пленки, с использованием формулы для низшей резонансной частоты колебаний полосы со свободными кромками:

$$f_1 = 3,57 \sqrt{\frac{B}{ml^4}}, \quad (1)$$

где B – изгибная жесткость $Eh^3b/12$, Н·м²; m – масса единицы длины ρhb , кг/м, полосы вибропоглотителя, l – длина полосы, м (E – модуль Юнга, Н/м²; h – толщина полосы, м; b – ширина полосы, м; ρ – плотность ее материала, кг/м³).

В качестве примера влияния, подобно настроенного по частоте вибропоглотителя описанного типа на вибрации, на рисунке 1 приведены спектры входной вибровозбудимости пластины при отсутствии (кривая 1) и наличии (кривая 2) на ней РПВ. Размеры пластины и РПВ $0,52 \times 0,38 \times 3 \cdot 10^{-3}$ м и $0,22 \times 0,08 \times 1,5 \cdot 10^{-3}$ м соответственно. Полимерная пленка марки ВПС-2,5 имела толщину 0,5 мм. Размещение РПВ привело к снижению уровня низшего резонансного максимума изгибных колебаний пластины с частотой 155 Гц примерно на 30 дБ. Уровень смещенного вибропоглотителем на частоту 143 Гц резонансного максимума оказался меньше уровня гасимого максимума на 19 дБ. Соответствующую разницу уровней резонансных максимумов в спектрах вибрации пластины при отсутствии и наличии РПВ здесь и далее будем называть его эффективностью.

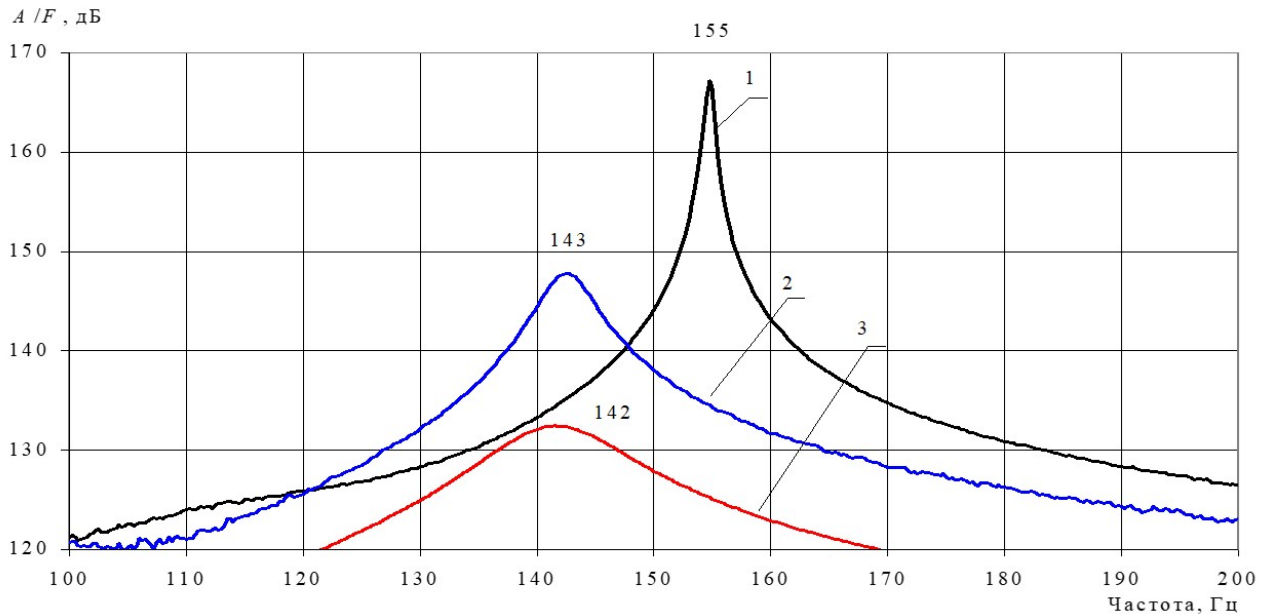


Рис. 1. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины при отсутствии (1) и установке (2) РПВ, а также при ее облицовке армированным вибропоглощающим покрытием (3)

При достаточно высокой (19 дБ) приведенной эффективности уменьшения уровней резонансного максимума вибрации вибропоглотителем они оказались на 16 дБ больше соответствующих уровней при полной облицовке поверхности пластины армированным вибропоглощающим покрытием, имеющим при таких же толщинах стального листа и полимерной пленки примерно в 10 раз большую, чем РПВ, массу. Возникает вопрос о влиянии длины и неизбежного при этом изменения оценочной частотной настройки РПВ на его эффективность.

Исследование влияния на эффективность РПВ описанного типа его длины и ухудшения его частотной настройки, осуществляемой, как правило, оценкой f_1 по приведенной формуле, до настоящего времени не выполнялась.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование влияния указанных факторов на эффективность резонансного полосового вибропоглотителя при его размещении на пластинах с размерами и диссипативными характеристиками, типичными для участков (ячеек) различного рода инженерных конструкций, находящихся между их соседними подкрепляющими элементами. Основное внимание уделено уменьшению вибропоглотителем уровней низшего резонансного максимума в спектре вибрации пластин, на частоте которого в большинстве случаев возникают наибольшие уровни их шумоизлучения.

1. Экспериментальные средства

Работа выполнялась с использованием двух демпфируемых пластин из стали с размерами в плане 0,5×0,5 м и 0,52×0,38 м. Первая являлась крышкой малогабаритного кожуха высотой 0,3 м и имела толщину 10^{-3} м. Вторая, толщиной $3 \cdot 10^{-3}$ м, крепилась по кромкам к монтажной рамке из швеллеров.

Демпфирование обеих пластин осуществлялось установкой на одну из их поверхностей вариантов вибропоглотителя в виде стальной полосы, облицованной полимерной пленкой из поливинилацетата. Геометрический центр (ГЦ) всех вариантов

РПВ располагался над ГЦ демпфируемой пластины, а наибольший размер вибропоглотителей был параллелен ее длинным краям.

На внешней поверхности крышки кожуха последовательно размещались РПВ с полосами толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м с максимальной длиной 0,26 и 0,5 м. Ширина полос соответственно равнялась 0,04 и 0,09 м.

Средством вибродемпфирования пластины на монтажной рамке, имеющим наибольшую длину 0,5 м, являлась облицованная полимерной пленкой стальная полоса, с шириной 0,08 м и толщиной 1,5 мм.

Во всех случаях была использована пленка марки ВПС-2,5 толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, имеющая максимальный коэффициент вибропоглощения $\eta = 1-3$ в диапазоне температур примерно от 10 до 30°С. Исследование эффективности описанных средств производилось при комнатной температуре.

Кроме вибропоглотителей в виде облицованных пленкой полос с указанной наибольшей длиной были испытаны аналогично расположенные на пластине вибропоглотители меньшей длины, создаваемые последовательным симметричным обрезанием участков у коротких краев испытанных вибропоглотителей, имеющих боольшую длину.

На основе вибропоглотителей с наибольшей длиной 0,26 м; 0,5 м ($b = 0,09$ м и $h = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м) и 0,5 м ($b = 0,08$ м и $h = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м) были изготовлены и испытаны 8, 13 и 9 менее габаритных РПВ соответственно. В каждой из соответствующих групп РПВ имелся полосовой вибропоглотитель с длиной, при которой оценочное значение низшей частоты колебаний его полосы равнялось измеренному значению низшей частоты f_{11} изгибных колебаний демпфируемой пластины.

Измерения вибрации при отсутствии и наличии вибропоглотителей выполнялись при сосредоточенном возбуждении пластин миниатюрным вибромолотком. Для удара по пластине кожуха и размещения на ней вибродатчика в зоне ГЦ РПВ имелось квадратное отверстие со стороной $\sim 1,5$ см. Место удара и размещения вибродатчика на пластине, установленной на монтажной рамке, находилось на свободной от РПВ стороне.

Измерялись уровни входной вибровозбудимости пластин в их геометрическом центре. Под входной вибровозбудимостью подразумевается величина

$$A/F = 20 \lg(AF_0/\alpha F), \text{ дБ}, \quad (2)$$

где A – уровень виброускорения в точке возбуждения (Гц) силой F , Н; α – пороговый уровень виброускорения, $10 - 6$ м/с²; $F_0 = 1$ Н.

Согласно расчету, по ранее приведенной формуле длина обоих частотно настроенных на низшую резонансную частоту демпфируемых пластин РПВ с толщиной соответственно 0,5 и 1,5 мм является практически одинаковой и равняется примерно 0,22 м.

2. Результаты измерений

Обратимся к рисунку 2, на котором приведены зависимости от длины РПВ уровней низшего резонансного максимума пластины – крышки кожуха ($f_{11} \approx 50$ Гц). Кривые 1 и 2 соответствуют группам РПВ с размерами от $10 \cdot 10^{-2}$ до $26 \cdot 10^{-2}$ м и от $10 \cdot 10^{-2}$ до $50 \cdot 10^{-2}$ м соответственно.

Последовательное уменьшение длин РПВ шириной 4 см от $l = 0,26$ м (кривая 1) привело к увеличению эффективности при большинстве его размеров, исключая длины 0,18 и 0,1 м. При первой длине (0,18 м) уровень гасимого резонансного максимума A/F пластины оказался таким же (150 дБ), как при нахождении на пластине РПВ с наибольшей

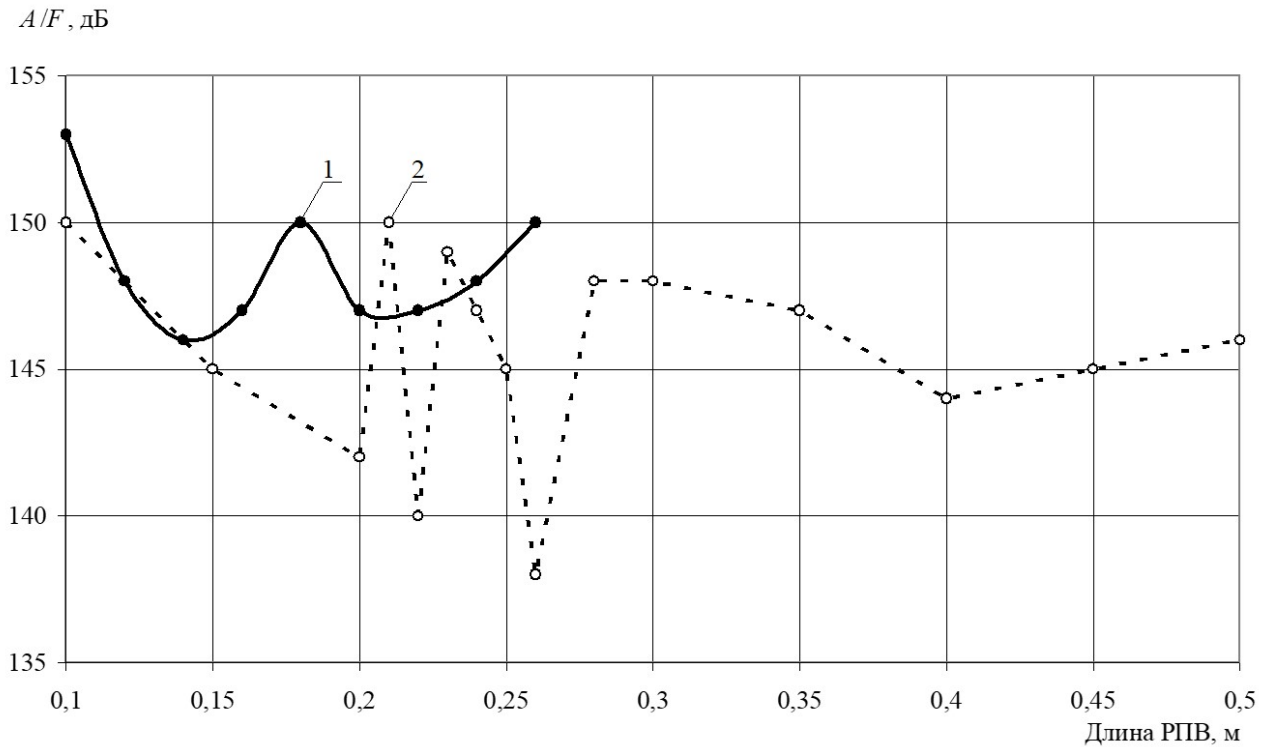


Рис. 2. Уровни входной вибровозбудимости пластины с вибропоглотителями шириной 0,04 м (1) и 0,09 м (2) различной длины

исходной длиной (0,26 м), а при второй (0,1 м) – на 3 дБ больше этого уровня и примерно таким же, как при отсутствии на пластине вибропоглотителя.

Вычисления показали, что в диапазонах длин РПВ от 0,26 до 0,18 м и от 0,18 до 0,1 м находятся значения l вибропоглотителей с оценочными величинами резонансной частоты изгибных колебаний полоски и сдвиговых колебаний полимерной пленки соответственно. Так, при ориентировочных значениях модуля упругости $106 \text{ Па} \leq E \leq 2 \cdot 10^6 \text{ Па}$ и плотности $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ поливинилацетата скорость распространения в нем волн сдвига $c \approx \sqrt{E/3\rho}$ находится в диапазоне значений от 14,4 до 20,5 м/с, а половина длины сдвиговой волны в пленке – от 0,13 до 0,18 м.

Сравнительно низкая (3–7 дБ) эффективность описанной (условно первой) группы РПВ обусловлена их малой массой, составляющей не более 3% массы демпфируемой пластины – крышки кожуха.

Отметим, что длина РПВ первой группы превышала их ширину не менее чем в 2,5 раза. В связи с этим, их армирующий элемент являлся полосой, что позволяло считать оценочное значение длины (0,22 м) РПВ, настроенного на частоту гасимого резонансного максимума демпфируемой пластины, достаточно достоверным.

Ширина РПВ второй группы, использованных для демпфирования пластины – крышки кожуха равнялась 9 см и отношение $l/b \geq 2,5$ выполнялось в пределах значений длины l от 0,5 до ~0,22 м.

Вибропоглотитель наибольшей длины ($l_{max} = 0,5 \text{ м}$) с относительной массой $\mu = 5,6\%$ несмотря на то, что его низшая резонансная частота была меньше частоты гасимого резонансного максимума пластины более чем в 5 раз, уменьшил уровень резонансного максимума на 7 дБ.

Эффективность РПВ длиной 0,45 и 0,4 м оказалась практически такой же, как у вибропоглотителя с наибольшей длиной, а дальнейшее уменьшение длины до 0,28 м

и массы РПВ привело к снижению его эффективности до ~ 5 дБ. (Оценочное значение резонансной частоты f_1 РПВ с указанной длиной составляет ~ 34 Гц).

Дальнейшее уменьшение длины l до 0,15 м и соответствующий рост частоты вибропоглотителя до ~ 110 Гц привели к достаточно сложной зависимости его эффективности от указанных параметров. В указанном диапазоне их изменения были обнаружены три размера l с достаточно высокой эффективностью РПВ от 11 до 15 дБ. Ее среднее значение (13 дБ) было зарегистрировано при длине РПВ $l = 0,22$ м, соответствующей продольному размеру вибропоглотителя с частотой f_1 , равной частоте f_p гасимого резонансного максимума колебаний пластины.

Два крайних значения эффективности с высокой вероятностью соответствовали размерам вибропоглотителей с резонансным явлением в армирующем элементе, колеблющемся совместно с полимерной пленкой. При минимальной длине вибропоглотителя $l = 0,1$ м его эффективность оказалась равной примерно 3 дБ.

Приведенные ранее результаты получены при ударах вибромолотком по той поверхности пластины, на которой размещались вибропоглотители.

Экспериментальные исследования эффективности РПВ при ударах по свободной от них поверхности выполнялись, как указывалось, с использованием пластины с размерами в плане $0,52 \times 0,38$ м, имеющей толщину $3 \cdot 10^{-3}$ м. Низшая резонансная частота изгибных колебаний пластины равнялась 149 Гц.

Измерения входной вибровозбудимости A/F пластины при нахождении на ней каждого из десяти испытанных вибропоглотителей проводились в четырех точках. Одна из них находилась в геометрическом центре, а другие – на одинаковом расстоянии от ГЦ до короткой и длинной кромок, а также до одного из углов пластины. Отличие величин эффективности, полученных в разных точках, от их среднего значения не превысило 2 дБ.

На рисунке 3 приведена типовая зависимость эффективности уменьшения вибрации пластины от длины вибропоглотителей, полученная по результатам измерения A/F в ее геометрическом центре.

Обращаясь к рисунку 3, видим, что в значительном диапазоне длин РПВ от 0,22 до 0,45 м и оценочных резонансных частот колебаний полос РПВ от ~ 150 до ~ 38 Гц их эффективность является практически одинаковой и составляет ~ 18 дБ. Нахождение размера $l = 0,22$ м, при котором $f_1 \approx f_p$ на нижней границе диапазона указанных значений Эф обусловлено, видимо, иным, чем при испытаниях РПВ второй группы, влиянием на вибрационные процессы волновых явлений в полимерной пленке. При большей (0,5 м) и меньших чем $l = 0,22$ м длинах РПВ наблюдается рост и снижение эффективности до максимального и наименьшего значений примерно 22 и 13 дБ.

Помимо измерений входной вибровозбудимости пластины при отсутствии и наличии на ней РПВ третьей группы были выполнены измерения возникающих при вибрации уровней звукового давления. Микрофон находился на расстоянии 1 м от пластины на нормали к ее не возбуждаемой вибромолотком поверхности, проведенной из геометрического центра. При всех РПВ эффективность уменьшения ими уровней звукового давления отличалась от эффективности уменьшения уровней входной вибровозбудимости не более, чем на обычную погрешность акустических измерений порядка 1–2 дБ.

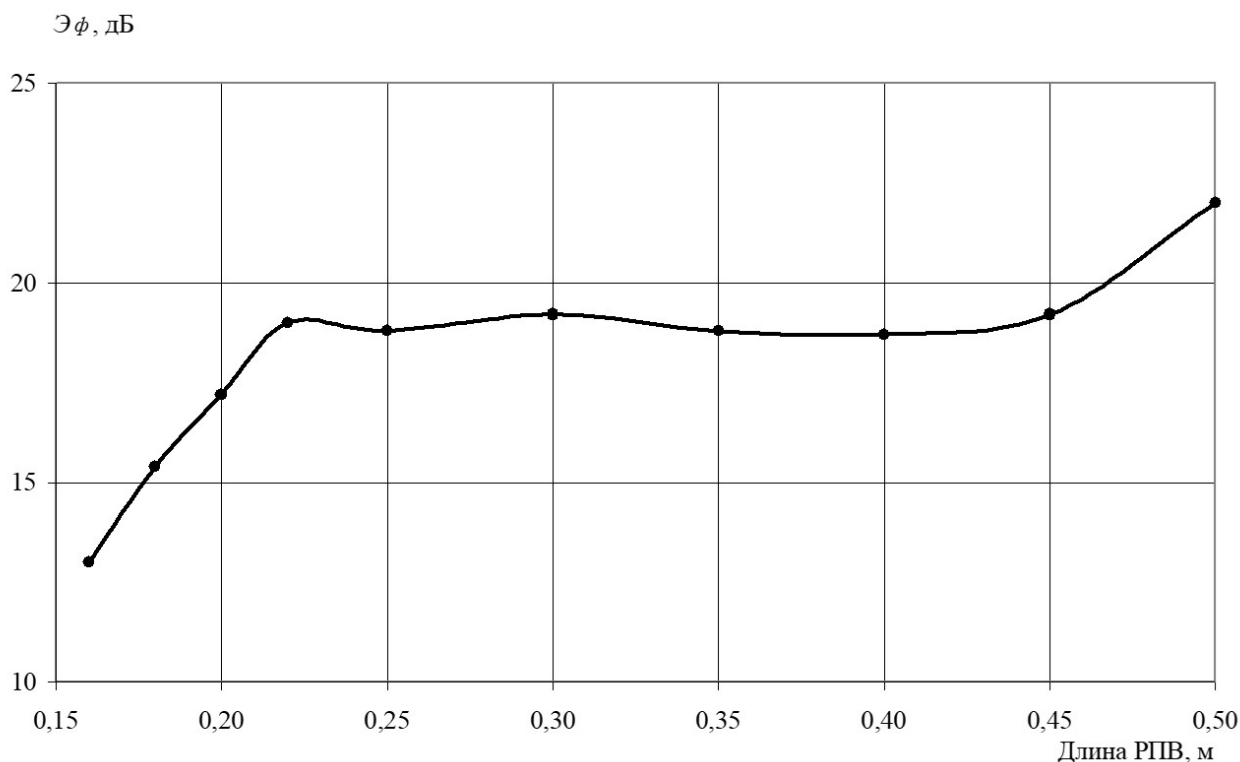


Рис. 3. Эффективность уменьшения входной вибровозбудимости пластины вибропоглотителями разной длины

Заключение

К основным результатам работы отнесем следующие:

- приведены значения эффективности уменьшения вибрации пластин группами РПВ, имеющих одинаковую ширину и различную длину в составе каждой группы, а также массу от 0,8 до ~10% массы пластины;
- установлено, что увеличение длины вибропоглотителя в сравнении с его оценочным продольным размером l , при котором выполняется условие настройки на частоту гасимого резонансного максимума, может привести как к уменьшению его эффективности (рисунок 2) из-за ухудшения его частотной настройки, так и к ее росту при не менее чем примерно двухкратном увеличении его длины и массы (рисунок 3);
- показано, что уменьшение длины испытанных вибропоглотителей более чем в 1,5–2,0 раза в сравнении с длиной l приводит к резкому уменьшению их эффективности;
- получена несколько большая эффективность имеющих примерно одинаковые размеры вибропоглотителей при их нахождении на невозбуждаемой виброповерхности;
- показано малое отличие эффективности РПВ по уменьшению ими уровней как вибрации, так и шумоизлучения пластины.

Список литературы

1. Кирпичников В.Ю. Вред и польза резонансных явлений в элементах судовых конструкций. - СПб., 2019. - 174с.

2. Алексеев С.А., Сятковский А.И. Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. - 2015. - N 16. - С. 43–46.
3. Sheikhi M.R., Sofuoğlu M.A., Li J. Vibration Damping Applications with Cork Composites. Cork-Based Materials in Engineering. Green Energy and Technology // Springer. - 2024. - N 4. - P. 31-46. DOI: 10.1007/978-3-031-51564-4_4
4. Zheng X., Wei C., Ming S. [et al.] New benchmark free vibration solutions of passive constrained layer damping beams by the symplectic method // Archive of Applied Mechanics. - 2024. - Vol. 94, N 3.- P. 3753–3764. DOI: 10.1007/s00419-024-02693-4
5. Канев Н.Г. Собственные частоты колебаний пластины на упругом основании винклеровского типа // Научный Журнал «Noise Theory and Practice». - 2020. – Т. 6, N 2. - С. 28-35.

References

1. Kirpichnikov V.Yu. Harm and benefit of resonance phenomena in elements of ship structures. - St. Petersburg, 2019. - 174 p.
2. Alekseev S.A., Syatkovsky A.I. Vibration damping properties of polymer films // Shipbuilding. - 2015. - N 16. - P. 43–46.
3. Sheikhi M.R., Sofuoğlu M.A., Li J. Vibration Damping Applications with Cork Composites. Cork-Based Materials in Engineering. Green Energy and Technology // Springer. - 2024. - N 4. - P. 31-46. DOI: 10.1007/978-3-031-51564-4_4
4. Zheng X., Wei C., Ming S. [et al.] New benchmark free vibration solutions of passive constrained layer damping beams by the symplectic method // Archive of Applied Mechanics. - 2024. - Vol. 94, N 3.- P. 3753–3764. DOI: 10.1007/s00419-024-02693-4
5. Kanev N.G. Natural frequencies of oscillations of a plate on an elastic foundation of the Winkler type // Scientific Journal 'Noise Theory and Practice'. - 2020. – Vol. 6, N 2. - P. 28-35.