

УДК 534.282

Мобильные широкополосные демпферы для демпфирования колебаний пластинчатых конструкций

Канд. техн. наук **Рыков С.А.**

*Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет (СПбГМТУ)*

190121, г. Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3

Кудрявцева И.В., канд. техн. наук **Рыков С.В.**

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

В настоящее время актуальным является вопрос полосового, целенаправленного демпфирования резонансных колебаний переборок, потолков, фундаментов и других подобных конструкций, в диапазоне низких и средних частот. Для этого в настоящее время активно используются различные вибродемпфирующие покрытия. При практическом использовании специальных покрытий для демпфирования резонансных колебаний затруднительно целенаправленно повысить эффективность демпфирования конструкций в заданных полосах частот в диапазоне низких и средних частот. С середины 80-х по середину 90-х интенсивно разрабатывался вопрос целенаправленного широкополосного демпфирования колебаний конструкций с использованием мобильных демпферов – локальных клиновых поглотителей (ЛКП). Совместное использование ЛКП и вибродемпфирующего покрытия позволяет существенно улучшить виброизоляцию пластинчатых конструкций. Экспериментально-теоретические исследования показали высокую эффективность применения ЛКП для широкополосного демпфирования колебаний фундаментов. В данной статье изложены теоретические основы применения ЛКП для пластинчатых конструкций. Получено выражение для оценки максимальной эффективности ЛКП при его установке на пластинчатую конструкцию, проведен анализ амплитудно-частотной зависимости коэффициента потерь пластины при установке на нее ЛКП. Моделирование проводилось в математическом пакете MathCad. На основе полученных зависимостей возможно сравнение эффективности ЛКП с разными значениями импедансов.

Ключевые слова: колебания, демпфер, локальный клиновой поглотитель, корабельное оборудование, холодильное оборудование.

Mobile broadband dampers for vibration plate structure

Ph.D. Rykov S.A.

*The St. Petersburg state sea technical university
(St. Petersburg State Marine Technical University)
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya St., 3*

Kudryavtseva I.V., *Ph.D. Rykov S.V.*

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

Currently pressing issue is the strip, focused damping of resonance oscillations bulkheads, ceilings, foundations and other similar structures in the range of low and medium frequencies. For this is being actively used different vibration damping coating. In practical use of special coatings for damping resonant vibrations purposefully difficult to increase the effectiveness of damping structures in a given frequency band in the range of low and medium frequencies. Since the mid-80s to mid-90s developed intensively question focused broadband vibration damping structures using mobile dampers - local wedge absorbers (LWA). Sharing the LWA and vibration damping coatings can significantly improve the vibration isolation plate designs. Experimental and theoretical studies have shown high efficiency of the LWA for broadband vibration-damping foundations. This article describes the theoretical foundations of the LWA for plate structures. An expression for the estimation of maximum efficiency LWA when mounted on the plate design, the analysis of the amplitude-frequency dependence of the loss factor of the plate when you install it on the LWA. The simulation was performed in mathematical package MathCad. On the basis of dependency possible to compare the effectiveness of the LWA with different impedances.

Key words: vibration damper, a local wedge absorber, vehicular equipment, refrigeration equipment.

Традиционно для широкополосного демпфирования используются разнообразные вибродемпфирующие покрытия (ВДП) [1, 2]. К недостаткам использования покрытий можно отнести большую трудоемкость их нанесения на корабельные конструкции, их значительную массу и не достаточную эффективность в низкочастотном диапазоне частот.

Локальный клиновидный поглотитель – это демпфер специальной конструкции, который отводит, преобразует и поглощает вибрацию из виброизолируемой конструкции (рис. 1) [3].

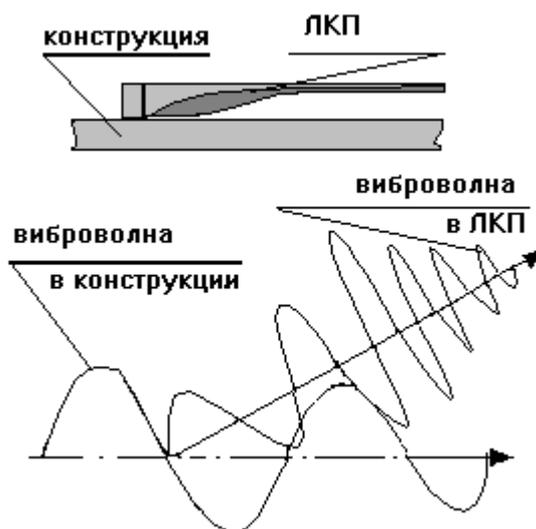


Рис. 1. Принцип работы ЛКП, установленного на виброизолируемую конструкцию

Высокая эффективность ЛКП определяется использованием преобразователя формы колебаний (рис. 2), в котором длинноволновые формы колебаний конструкции трансформируются в коротковолновые формы колебаний элемента демпфера. По мере распространения изгибной волны по длине преобразователя формы колебаний (благодаря его особой клиновидной форме профиля) происходит не только уменьшение длины изгибной волны, но и рост амплитуды распространяющейся вброволны (рис. 2). В результате создаются оптимальные условия для эффективной работы ВДП, нанесенного на преобразователь, а именно:

- большая амплитуда вброволны,

– малая длина виброволны по отношению к размеру клинового элемента.

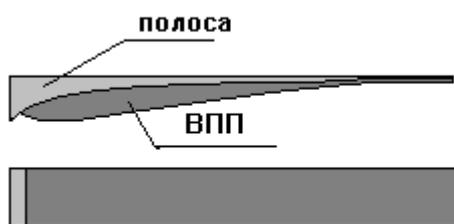


Рис. 2. Преобразователь формы колебаний

Эффективность применения локальных клиновых поглотителей (ЛКП) проявляется в максимальной степени на резонансных колебаниях конструкции, то более информативным при конструировании малозумных машин является усредненная характеристика величины коэффициента потерь вносимая установкой на пластину нескольких поглотителей. Для этой цели предпочтительнее использовать энергетические [1] методы расчета виброакустических характеристик конструкций.

Получим расчетные соотношения для оценки эффективности ЛКП, установленных на пластине.

Воспользуемся развитым аппаратом диффузного вибрационного поля [1] для оценки величины ожидаемого коэффициента потерь ограниченной пластины при установке на ней конечного числа ЛКП.

Энергию (W_{LKP}), поступающую в симметричный клиновой вибропоглотитель, можно определить в виде

$$W_{LKP} = \frac{\dot{\xi}_{pl}^2}{2} \operatorname{Re} Z_{LKP}, \quad (1)$$

где $\dot{\xi}_{pl}$ – скорость колебания пластины в месте установки ЛКП, Z_{LKP} – входной импеданс стержневого ЛКП.

Скорость колебаний пластины, в месте установки ЛКП можно выразить через среднеквадратичную скорость пластины без ЛКП ($\dot{\xi}_{pl}$)

$$\dot{\xi}_{pl_lkp} = \dot{\xi}_{pl} \frac{|Z_{\infty pl}|}{|Z_{\infty pl} + Z_{LKP}|} = \dot{\xi}_{pl} \frac{1}{1 + |Z_{LKP}|/|Z_{\infty pl}|}, \quad (2)$$

где $Z_{\infty pl} = \frac{4}{\sqrt{3}} m_{pl} h_{pl} C_{pr_pl}$ – входной импеданс бесконечной пластины по отношению к точечной силе, $m_{pl} = \rho_{pl} h_{pl}$ – масса единичной поверхности пластины, ρ_{pl} – плотность массы материала

пластины, h_{pl} – толщина пластины, $C_{pr_pl} = \sqrt{\frac{E_{pl}}{\rho_{pl} (1 - \sigma_{pl}^2)}}$ – скорость продольной волны в

пластине, E_{pl} – модуль упругости материала пластины, σ_{pl} – коэффициент Пуассона материала пластины.

Выражение (1), при использовании нескольких ЛКП, с учетом (2) можно записать в виде

$$W_{LKP} = w \cdot \beta_{LKP}, \quad (3)$$

где $w = \frac{\xi_{pl}^2 \cdot m_{pl}}{2}$ – плотность энергии вибрации в пластине, $\beta_{LKP} = \frac{n \operatorname{Re} Z_{LKP}}{m_{pl} \gamma_Z^2}$ – коэффициент,

характеризующий поглощение энергии вибрации ЛКП, $\gamma_Z = 1 + \frac{|Z_{LKP}|}{|Z_{\infty pl}|}$, n – количество одинаковых

ЛКП, установленных на пластине.

Уравнение сохранения энергии диффузного вибрационного поля [1] для отдельной пластины можно записать в виде

$$W_I - \beta_{pl} + \beta_{LKP} \cdot w = 0, \quad (4)$$

где W_I – энергия, поступающая в пластину от источника энергии вибрации, $\beta_{pl} = \omega \eta_{pl} S$ – коэффициент, характеризующий поглощение энергии вибрации, за счет внутренних потерь в пластине.

Энергию вибрации, поглощаемую пластиной с установленными ЛКП, используя выражение (3), можно записать в виде

$$\omega \eta_{pl_lkp} S \cdot w = \beta_{pl} + \beta_{LKP} \cdot w, \quad (5)$$

где η_{pl_lkp} – коэффициент пластины с установленными ЛКП.

После преобразований выражения (5), получим выражения для ожидаемого коэффициента потерь в пластине с установленными ЛКП

$$\eta_{pl_lkp} = \eta_{pl} + \eta_{lkp}, \quad (6)$$

где η_{lkp} – ожидаемое усредненное изменение значения коэффициента потерь пластины при установке n ЛКП.

Таким образом, ожидаемое усредненное изменение значения коэффициента потерь (η_{lkp}) пластины при установке n одинаковых ЛКП примет вид

$$\eta_{lkp} = \frac{n \cdot \beta_{LKP}}{\omega \cdot S_{pl}} = \frac{n \operatorname{Re} Z_{LKP}}{\omega m_{pl} S_{pl} \gamma_Z^2}. \quad (7)$$

Максимальная оценка эффективности одного ЛКП, установленного на пластине

Для проведения практических расчетов необходимо определить величину импеданса (Z_{LKP}) ЛКП. При практическом использовании ЛКП интерес представляет оценка максимальной эффективности ЛКП. Как показали асимптотические оценки импеданса ЛКП по отношению к нормальной силе, средний импеданс симметричного ЛКП стремится к импедансу бесконечного стержня. Следовательно, в первом приближении для оценки максимальной эффективности, импеданс ЛКП можно представить в виде импеданса бесконечной балки [2] с параметрами сечения и материала такими же, как и на корневом конце ЛКП

$$Z_{LKP} = 2m_b c_{iz_b} (1 + j), \quad (8)$$

где $m_b = \rho_b S_b$ – погонная масса корневого участка ЛКП, ρ_b – плотность массы материала ЛКП, $S_b = h_b b_b$ – площадь поперечного сечения корневого участка ЛКП, h_b – толщина корневой части ЛКП, b_b – ширина корневой части ЛКП, $c_{iz_b} = \left(\frac{E_b I_b}{m_b} \right)^{0.25} \omega^{0.5}$ – скорость изгибной волны в корневом участке ЛКП, E_b – модуль упругости материала ЛКП, I_b – момент инерции площади поперечного сечения корневого элемента ЛКП.

Учитывая (8) выражения для модуля импеданса и реальной части импеданса ЛКП примут вид

$$\begin{aligned} |Z_{LKP}| &= 2\sqrt{2}m_b c_{iz_b}, \\ \text{Re } Z_{LKP} &= |Z_{LKP}|/\sqrt{2}. \end{aligned} \tag{9}$$

Учитывая (9), выражение (7) для расчета ожидаемого усредненного значения коэффициента потерь (η_{lkp}) пластины при установке n одинаковых ЛКП примет вид

$$\eta_{lkp} = \frac{n \cdot 2 E_b I_b m_b^3}{\omega^{0.5} m_{pl} S_{pl} \gamma_Z^2} \tag{10}$$

где $\gamma_Z = 1 + \frac{2\sqrt{6}m_b c_{iz_b}}{4m_{pl} h_{pl} C_{pr}}$.

Для получения численных значений эффективности использования ЛКП проведем расчеты для стальной пластины размером $l_1 \times l_2 = 1 \times 1$ м² и толщиной $h_{pl} = 10$ мм. На пластину установлен один стальной ЛКП толщиной $H1_b = 10$ мм, шириной $B1_b = 300$ мм. Расчет производится в диапазоне частот 10 Гц–10 кГц с использованием программного обеспечения [4–7].

Амплитудно-частотная характеристика η_{lkp} приведена на рис. 3. Частотная характеристика η_{lkp} носит выраженный частотно зависимый характер. Это обусловлено различной зависимостью изменения импеданса пластины и ЛКП от частоты. Максимум коэффициента потерь $\eta_{1_{max}} = 0.198$ пластины достигается на минимальной частоте $f_{1_{min}} = 10$ Гц.

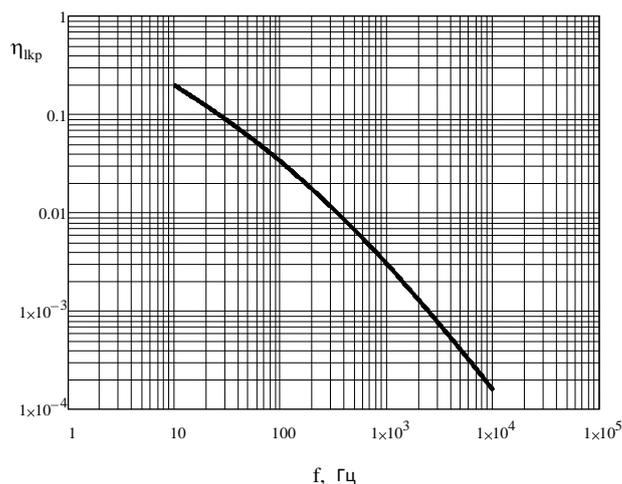


Рис. 3. Амплитудно-частотная зависимость ожидаемого усредненного значения коэффициента потерь (η_{lkp}) пластины при установке одного ЛКП

Выводы

1. Получено расчетное выражение для оценки максимальной эффективности ЛКП, установленного на пластинчатой конструкцию.
2. Расчетные оценки показывают, что амплитудно-частотная зависимость коэффициента потерь пластины с установленным ЛКП имеет существенную частотную зависимость и уменьшается с ростом частоты.
3. Анализ методик демпфирования резонансных колебаний, приведенные в данной статье, позволяет сделать вывод о возможности их использования для целей уменьшения колебаний холодильного оборудования [8–14] и оборудования пищевой промышленности [15, 16].

Список литературы

1. Никифоров А.С., Будрин С.В. Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах. - Л.: Судостроение, 1968. – 215 с.
2. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций: Справочник. – Л.: Судостроение, 1990. – 200 с.
3. А.с. № 258826 СССР, МКИ4 кл. В63Н 21/30, Е02D 27/52. Узел виброизоляции / А.В. Авринский, С.А. Рыков, И.К. Пименов, М.В. Бернблит. 1987 г., – 9 с.
4. Буткарев А. Г., Рыков В. А., Рыков С. А. Эффективное использование редактора MS WORD для оформления документов большого объема // Пособие для самостоятельной работы /; Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский гос. ун-т низкотемпературных и пищевых технологий. Санкт-Петербург, 2007.
5. Кудрявцева И.В., Рыков В.А., Рыков С.А., Рыков С.В. Использование MathCAD в теории матриц: Метод. указания. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2011. – 50 с.
6. Рыков В.А., Рыков С.А., Кудрявцева И.В., Рыков С.В. Практические занятия в пакете MathCAD по исследованию систем линейных алгебраических уравнений: пособие. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2009. – 107 с.
7. Математика. Теория и примеры в MathCAD: Пособие / И.В. Кудрявцева, В.А. Рыков, А.С. Старков, С.А. Рыков, С.В. Рыков – СПб.: СПбГУНиПТ, 2011. – 92 с.

8. Носков А.Н., Петухов В.В. Изменение параметров состояния пара хладагента в элементарном рабочем процессе маслозаполненного холодильного винтового компрессора // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2007. № 1. С. 10–14.

9. Носков А.Н., Зимков А.А. Расчет процесса сжатия маслозаполненного холодильного винтового компрессора // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2013. № 1. С. 3.

10. Бараненко А.В., Кириллов В.В., Сивачев А.Е. О выборе хладоносителя для систем косвенного охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2010. № 2. С. 22–24.

11. Пронин В.А. Тенденции развития компрессорной техники // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2014. № 1. С. 9.

12. Рыков А.В., Кудрявцева И.В., Рыков В.А. Асимметричное масштабное уравнение состояния хладона R23 // Вестник Международной академии холода. 2012. № 4. С. 26–28.

13. Kozlov A.D., Lysenkov V.F., Popov P.V., Rykov V.A. Single non-analytic equation of R218 chladon state // Инженерно-физический журнал. 1992. Т. 62. № 6. С. 840–847.

14. Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков В.А. Асимметричное масштабное уравнение состояния аргона в переменных плотность-температура // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2008. № 2. С. 6–11.

15. Пеленко В.В., Арет В.А., Кайка А.Х., Тарабановский Ф.Б., Ольшевский Р.Г., Бобров С.В., Зуев Н.А. Разработка математической модели процесса измельчения мясного сырья в волчках // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2. С. 49.

16. Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков В.А. Особенности расчета термодинамических характеристик сверхкритических флюидов, используемых в СКФ-технологиях // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 1. С. 48.

References

1. Nikiforov A.S., Budrin S.V. Rasprostranenie i pogloshchenie zvukovoi vibratsii na sudakh. L.: Sudostroenie, 1968. – 215 s.

2. Nikiforov A.S. Akusticheskoe proektirovanie sudovykh konstruktssii: Spravochnik. – L.: Sudostroenie, 1990. – 200 s.

3. A.s. № 258826 SSSR, MKI4 kl. B63N 21/30, E02D 27/52. Uzel vibroizolyatsii / A.V. Avrinskii, S.A. Rykov, I.K. Pimenov, M.V. Bernblit. 1987 g., – 9 s.

4. Butkarev A. G., Rykov V. A., Rykov S. A. Effektivnoe ispol'zovanie redaktora MS WORD dlya oformleniya dokumentov bol'shogo ob'ema // Posobie dlya samostoyatel'noi raboty /; Federal'noe agentstvo po obrazovaniyu, Sankt-Peterburgskii gos. un-t nizkotemperaturnykh i pishchevykh tekhnologii. Sankt-Peterburg, 2007.

5. Kudryavtseva I.V., Rykov V.A., Rykov S.A., Rykov S.V. Ispol'zovanie MathCAD v teorii matrits: Metod. ukazaniya. – SPb.: SPbGUNIPT, 2011. – 50 s.

6. Rykov V.A., Rykov S.A., Kudryavtseva I.V., Rykov S.V. Prakticheskie zanyatiya v pakete MathCAD po issledovaniyu sistem lineinykh algebraicheskikh uravnenii: posobie. – SPb.: SPbGUNIPT, 2009. – 107 s.

7. Matematika. Teoriya i primery v MathCAD: Posobie / I.V. Kudryavtseva, V.A. Rykov, A.S. Starkov, S.A. Rykov, S.V. Rykov – SPb.: SPbGUNIPT, 2011. – 92 s.

8. Noskov A.N., Petukhov V.V. Izmenenie parametrov sostoyaniya para khladagenta v elementarnom rabochem protsesse maslozapolnennogo kholodil'nogo vintovogo kompressora // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie. 2007. № 1. S. 10–14.

9. Noskov A.N., Zimkov A.A. Raschet protsessa szhatiya maslozapolnennogo kholodil'nogo vintovogo kompressora // *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie»*. 2013. № 1. S. 3.
10. Baranenko A.V., Kirillov V.V., Sivachev A.E. O vybore khladonositelya dlya sistem kosvennogo okhlazhdeniya // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2010. № 2. S. 22–24.
11. Pronin V.A. Tendentsii razvitiya kompressornoj tekhniki // *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie*. 2014. № 1. S. 9.
12. Rykov A.V., Kudryavtseva I.V., Rykov V.A. Asimmetrichnoe masshtabnoe uravnenie sostoyaniya khladona R23 // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2012. № 4. S. 26–28.
13. Kozlov A.D., Lysenkov V.F., Popov P.V., Rykov V.A. Single non-analytic equation of R218 chladon state // *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1992. T. 62. № 6. S. 840–847.
14. Rykov S.V., Kudryavtseva I.V., Rykov V.A. Asimmetrichnoe masshtabnoe uravnenie sostoyaniya argona v peremennykh plotnost'-temperatura // *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie»*. 2008. № 2. S. 6–11.
15. Pelenko V.V., Aret V.A., Kaika A.Kh., Tarabanovskii F.B., Ol'shevskii R.G., Bobrov S.V., Zuev N.A. Razrabotka matematicheskoi modeli protsessa izmel'cheniya myasnogo syr'ya v volchkakh // *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2013. № 2. S. 49.
16. Rykov S.V., Kudryavtseva I.V., Rykov V.A. Osobennosti rascheta termodinamicheskikh kharakteristik sverkhkriticheskikh flyuidov, ispol'zuemykh v SKF-tekhnologiyakh // *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2014. № 1. S. 48.