

УДК 534.282

## Критерии оценки эффективности мобильных демпферов, установленных на пластинчатых поверхностях холодильных машин

Канд. техн. наук **Рыков С.А.**

СПбГМТУ

190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3

д-р техн. наук, проф. **Рыков С.В.**

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*Локальные клиновые поглотители (ЛКП) подходят для целенаправленного широкополосного демпфирования колебаний конструкций различного назначения. Использование ЛКП имеет ряд достоинств по сравнению с получившими широкое распространение вибродемпфирующими покрытиями. Исследования, проводимые в конце прошлого века, показали возможность применения ЛКП для виброизоляции конструкций. В статье рассматриваются различные варианты конструкции ЛКП, предназначенных для демпфирования резонансных колебаний, возникающих в различном технологическом оборудовании. Проведен анализ ЛКП различных геометрических размеров (толщина и ширина) с разными значениями импедансов. В статье получены зависимости для оценки среднего коэффициента потерь пластины и максимальной частоты эффективной работы ЛКП. Приведено сравнение величин среднего и максимального коэффициента потерь пластины, диапазону частот эффективного использования, массе различных вариантов исполнения ЛКП. Рассматривается возможность использования нескольких ЛКП с соотношением импедансов больше единицы. Расчеты были проведены в математическом пакете MathCad. Намечены направления дальнейшего совершенствования мобильного демпфера путем модернизации его конструкции.*

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

---

## Criteria of the assessment of efficiency of the mobile dampers established on lamellar surfaces of refrigerators

**Rykov S.A.,**

The St. Petersburg state sea technical university  
(St. Petersburg State Marine Technical University)

190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya St., 3

D.Sc. prof. **Rykov S.V.**

ITMO University

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

*Local wedge absorbers (LWA) are suitable for targeted broadband vibration damping structures for various purposes. Using the LWA has several advantages compared with obtaining widespread vibration damping coatings. Research carried out at the end of the last century, have shown the possibility of using the LWA for vibration control of structures. The article discusses the various design options LWA designed for*

*damping resonant vibrations arising in various process equipment. The analysis of the LWA different geometric dimensions (thickness and width) with different impedances. In this paper according to estimate the average loss factor of the plate and the maximum frequency of effective work LWA. The comparison of the average and maximum values of the loss factor of the plate, the frequency range of effective use, weight of various embodiments of the LWA. The possibility of using several LWA impedance ratio is greater than one. The calculations were made in the mathematical package MathCad. Identified the areas to further improve mobile damper by upgrading its design.*

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

В статье [1] (см. также [2–4]) получено расчетное выражение для определения величины коэффициента потерь  $\eta_{lkp}$  пластины с установленным на нее локальным клиновым поглотителем (ЛКП). Анализ зависимости коэффициента потерь пластины  $\eta_{lkp}$  от  $|Z_{LKP}|/|Z_{\infty pl}|$  показывает, что функция  $\eta_{lkp} = f\left(\frac{|Z_{LKP}|}{|Z_{\infty pl}|}\right)$  является унимодальной, и достигает своего оптимума (максимального значения) при  $\eta_{l_{opt}} = 0.344$  при

$$\frac{|Z_{LKP}|}{|Z_{\infty pl}|} = 1. \tag{1}$$

На рис. 1 приведены значения  $\eta_{lkp}$  в зависимости от изменения соотношения импедансов  $|Z_{LKP}|/|Z_{\infty pl}|$  на частоте  $f_{1_{min}} = 10$  Гц. Геометрические характеристики ЛКП и пластины приведены в [1], опубликованной в данном сборнике.

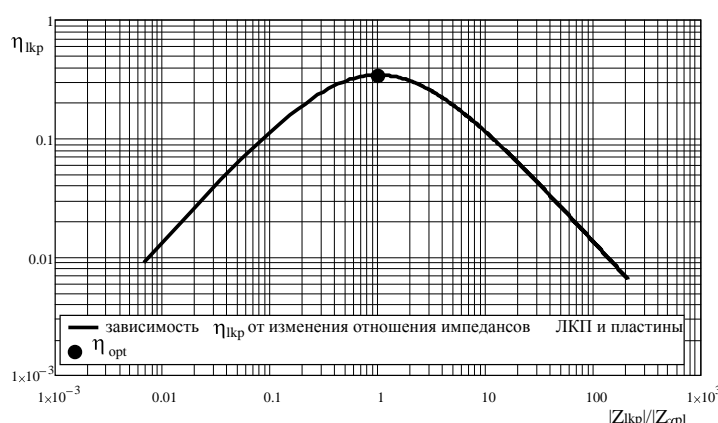


Рис. 1. Изменение ожидаемого усредненного значения коэффициента потерь ( $\eta_{lkp}$ ) пластины с установленным ЛКП от изменения соотношения импедансов  $|Z_{LKP}|/|Z_{\infty pl}|$  на частоте  $f_{1_{min}} = 10$  Гц

Используя соотношение (1), выражения для расчета оптимальной ширины (толщины) при известной толщине (ширине) корневой части ЛКП примут соответственно вид

$$b_{opt} = \frac{0.606 \cdot h_{pl}^2 \rho_{pl} \sqrt{\frac{E_{pl}}{\rho_{pl} (1 - \sigma_{pl}^2)}}}{h_b E_b h_b^2 \rho_b^{0.25} \sqrt{f_{min}}}, \quad (2)$$

$$h_{opt} = \frac{0.716 \cdot h_{pl}^{4/3} \rho_{pl}^{2/3} \left( \frac{E_{pl}}{\rho_{pl} (1 - \sigma_{pl}^2)} \right)^{1/3}}{E_b^{1/6} b_b^{2/3} \rho_b^{1/2} f_{min}^{1/3}}. \quad (3)$$

На рис. 2 приведена зависимость  $\eta_{лкр}$  от изменения ширины ЛКП при толщине ЛКП  $H1_b = 10$  мм на частоте  $f1_{min} = 10$  Гц. Оптимальное демпфирование  $\eta1_{opt} = 0.344$  достигается при оптимальной ширине  $B1_{opt} = 1.43$  м.

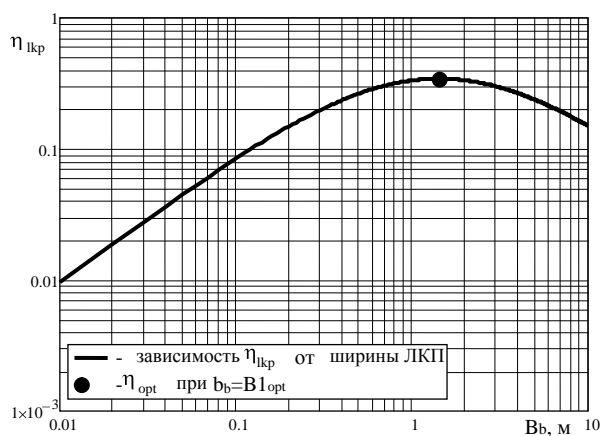


Рис. 2. Зависимость  $\eta_{лкр}$  от изменения ширины ЛКП при толщине ЛКП

$$H1_b = 10 \text{ мм на частоте } f1_{min} = 10 \text{ Гц.}$$

На рис. 3 приведена зависимость  $\eta_{лкр}$  от изменения толщины ЛКП при ширине ЛКП  $B1_b = 0.3$  м на частоте  $f1_{min} = 10$  Гц.

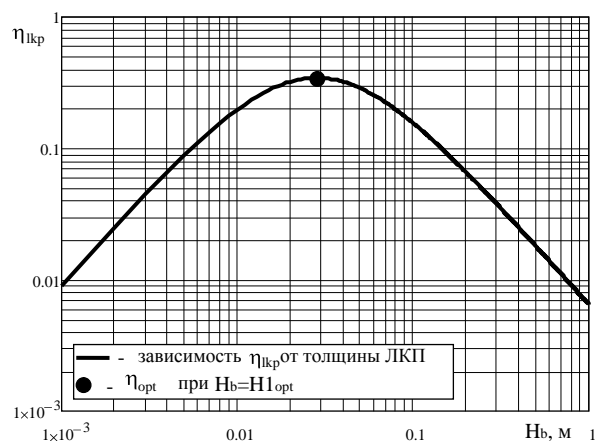


Рис. 3. Зависимость  $\eta_{lkp}$  от изменения толщины ЛКП при ширине ЛКП

$$B_b = 300 \text{ мм на частоте } f_{1_{\min}} = 10 \text{ Гц.}$$

Оптимальное демпфирование  $\eta_{1_{opt}} = 0.344$  достигается при оптимальной толщине  $H_{1_{opt}} = 28 \text{ мм}$ .

Анализ зависимостей на рис. 2 и 3 показывает, что:

– при использовании оптимальных размеров ЛКП достигается одинаковое максимальное значение коэффициента потерь пластины  $\eta_{\max} = 0.34$  на частоте  $f_{1_{\min}} = 10 \text{ Гц}$ , что в 1.7 больше, чем при использовании ЛКП с первоначальными параметрами (толщиной  $H_{1_b} = 10 \text{ мм}$ , шириной  $B_{1_b} = 300 \text{ мм}$ ).

На рис. 4 приведены амплитудно-частотные характеристики  $\eta_{lkp}$  (выражение (9) в [1]), для четырех вариантов одиночных ЛКП, установленных на пластину, параметры которой приведены [1].

В варианте 1 размеры ЛКП выбраны из условия достижения максимального коэффициента потерь  $\eta_{\max} = 0.2$  пластины на минимальной частоте  $f_{\min} = 10 \text{ Гц}$  при

отношении импедансов  $\frac{|Z_{LKP}|}{|Z_{\infty pl}|} < 1$ .

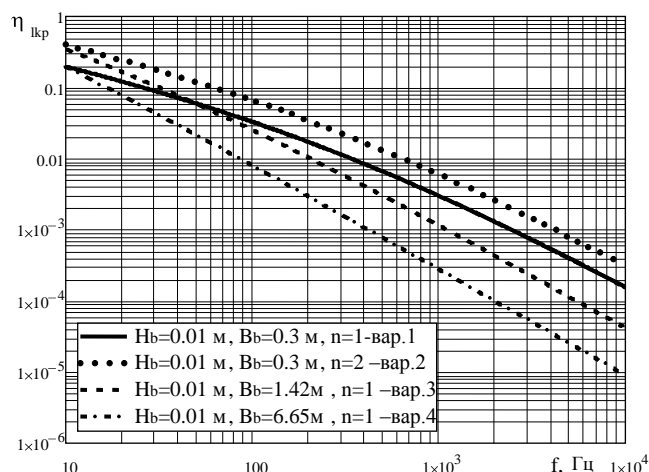


Рис. 4. Амплитудно-частотная зависимость  $\eta_{лкр}$  для четырех вариантов ЛКП при изменении его ширины и количества

В варианте 2 использовались два одинаковых ЛКП с размерами, такими же, как в варианте 1.

В варианте 3 размеры ЛКП соответствовали оптимальным размерам, вычисленным по выражениям (2) на минимальной частоте  $f_{\min} = 10$  Гц (отношении импедансов  $\frac{|Z_{ЛКП}|}{|Z_{\infty pl}|} = 1$ ).

В варианте 4 размеры ЛКП выбраны из условия достижения максимального коэффициента потерь  $\eta_{\max} = 0.2$  пластины на минимальной частоте  $f_{\min} = 10$  Гц при отношении импедансов  $\frac{|Z_{ЛКП}|}{|Z_{\infty pl}|} > 1$ .

Геометрические характеристики ЛКП для рассмотренных вариантов приведены в таблице 1.

Анализ кривых на рис. 4 показывает, что:

- коэффициент потерь пластины  $\eta_{лкр}$  с ростом частоты убывает по разным законам для разных вариантов исполнения ЛКП,
- для сравнительной оценки эффективности различных вариантов ЛКП не корректно использовать максимальное значение  $\eta_{\max}$  на частоте  $f_{\min}$ ,
- для сравнительной оценки эффективности различных вариантов ЛКП необходимо использовать три параметра:

1) среднее значение коэффициента потерь пластины  $\eta_{ср}$ , рассчитанное в диапазоне  $\eta_{\max} - \eta_{\min}$  ( $\eta_{\min}$  – минимальное значение коэффициента потерь пластины при котором ЛКП еще эффективно работает) определенное, как

$$\eta_{1cp} = \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{n \cdot Z_{0LKP}}{\sqrt{2} \cdot 2\pi f^{0.5} M_{pl} \left( 1 + \frac{Z_{0LKP} \cdot 2\pi f^{0.5}}{Z_{\infty pl}} \right)^2} df}{f_{\max} - f_{\min}}, \quad (4)$$

где  $Z_{0LKP} = 2\sqrt{2} E_b I_b m_b^3 \omega^{0.25} = \frac{|Z_{LKP}|}{\omega^{0.5}}$  – модуль импеданса стержневого ЛКП, нормированный на  $\omega^{0.5}$ ;

2) ширину диапазона частот  $f_{\min} - f_{\max}$ , в котором коэффициент потерь в пластине изменяется в диапазоне  $\eta_{\max}$  до  $\eta_{\min}$ . Максимальная частота  $f_{\max}$  на которой ЛКП имеет минимальную эффективность, то есть создает в пластине коэффициент потерь  $\eta_{\min}$ , рассчитывается по выражению

$$f_{\max} = \frac{\sqrt[3]{4} \sqrt[3]{4B} \sqrt[3]{D} - 2^4}{288\pi B^4 \sqrt[3]{D^2}}. \quad (5)$$

где  $D = \frac{2A + 27B + 3AB^3 \sqrt{\frac{3 \cdot 4A + 27B}{A^2 B^5}}}{AB^3}$ ,  $A = \frac{\sqrt{2} \eta_{\min} M_{pl}}{n}$ ,  $M_{pl} = \rho_{pl} h_{pl} S_{pl}$  – масса пластины,  $B = \frac{Z_{0LKP}}{|Z_{\infty pl}|}$ ;

3) суммарную массу  $M_{var.i}$  ЛКП, установленных на пластине.

Примем минимальный коэффициент потерь пластины, при котором ЛКП еще эффективен, равным  $\eta_{\min}=0.1$ . Сравнение эффективности различных вариантов исполнения ЛКП проводилось по трем критериям:

- средней коэффициент потерь  $\eta_{cp}$  в эффективном диапазоне использования ЛКП;
- диапазон частот  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$  эффективного использования ЛКП,  $f_{\max}$  рассчитывается по (5);

– относительная масса  $\frac{M_{var.i}}{M_{var.1}}$  (где  $M_{var.i}$  – суммарная масса i-го варианта ЛКП,  $M_{var.1}$  – масса ЛКП первого (исходного) варианта) используемого ЛКП.

Результаты расчета эффективности разных вариантов ЛКП приведены в таблице 1.

Таблица 1

Эффективность использования четырех вариантов исполнения ЛКП, установленных на пластине

Тип ЛКП	$h_b$ (м)	$b_b$ (м)	Кол. $n$	$\frac{M_{вар.i}}{M_{вар.1}}$	$\eta_{max}$	$\eta_{cp}$	$\Delta f$ Гц	$\frac{ Z_{LKП} }{ Z_{\infty pl} }$
Вариант 1	0.01	0.3	1	1	0.2	0.137	16	0.21
Вариант 2	0.01	0.3	2	2	0.4	0.18	52.1	0.21
Вариант 3	0.01	1.42	1	4.73	0.34	0.178	21.7	1
Вариант 4	0.01	6.65	1	22.2	0.2	0.141	6.8	4.66

Анализ эффективности исполнения различных вариантов исполнения ЛКП (таблица 1) показал:

– максимальный эффект дает применение двух ЛКП с отношением импедансов  $\frac{|Z_{LKП}|}{|Z_{\infty pl}|} < 1$  (вариант 2);

– наихудшим является вариант 4 ЛКП ( $\frac{|Z_{LKП}|}{|Z_{\infty pl}|} > 1$ ). По сравнению с вариантом 1, при приблизительно одинаковом среднем коэффициенте потерь ( $\eta_{cp} = 0.137$ ) масса ЛКП в 22.2 больше, а частотный диапазон эффективного использования более чем в 2 раз меньше.

– сравнение вариантов 3 и 2 показало, что при приблизительно одинаковом среднем значении коэффициента потерь, эффективность оптимального ЛКП (вариант 3) по частотному диапазону в 2.4 раза меньше, а вес ЛКП в 2.36 больше.

Обобщая сказанное, можно заключить, что наиболее перспективным является использование нескольких ЛКП, каждый из которых обеспечивает максимальный коэффициент потерь  $\eta_{max}$  меньше максимально достижимого (оптимального) и имеет соотношение импедансов  $\frac{|Z_{LKП}|}{|Z_{\infty pl}|} < 1$ .

Расчеты и оформление отчета о проделанной работе проводились с помощью современных программных продуктов [5–8]. Ведется активная работа по использованию результатов исследования по их применению в холодильной [9–12] и пищевой промышленности [13–15].

### Выводы

1. Предложено оценивать эффективность различных конструкций ЛКП, используемых на пластинчатых конструкциях по трем критериям:

– среднему коэффициенту потерь пластины с ЛКП в диапазоне частот эффективной работы ЛКП

– величине диапазона частот эффективной работы ЛКП

– общей массе ЛКП, установленных на пластине.

2. Получены выражения для оценки эффективности использования на пластинчатых конструкциях ЛКП:

– для расчета среднего коэффициента потерь пластины с ЛКП в диапазоне частот эффективной работы ЛКП,

– для расчета максимальной частоты эффективной работы ЛКП.

3. Показано, что перспективным является использование нескольких ЛКП с соотношением импедансов  $\frac{|Z_{LKP}|}{|Z_{opl}|} < 1$ .

### Список литературы

1. Рыков С.А. Мобильные широкополосные демпферы для демпфирования колебаний пластинчатых конструкций // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 2. С. 48.

2. Никифоров А.С., Будрин С.В. Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах. - Л.: Судостроение, 1968. – 215 с.

3. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций: Справочник. – Л.: Судостроение, 1990. – 200 с.

4. А.с. № 258826 СССР, МКИ4 кл. В63Н 21/30, E02D 27/52. Узел виброизоляции / А.В. Авринский, С.А. Рыков, И.К. Пименов, М.В. Бернблит. 1987 г., – 9 с.

5. 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.

6. Кудрявцева И.В., Рыков В.А., Рыков С.А., Рыков С.В. Использование MathCAD в теории матриц: Метод. указания. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2011. – 50 с.

7. 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.

8. 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.

9. Докукин В.Н., Емельянов А.Л., Носков А.Н. Результаты испытаний маслозаполненного винтового компрессора малой производительности в



высокотемпературных режимах // Вестник Международной академии холода. 2009. № 1. С. 6–8.

10. Ховалыг Д., Бараненко А.В. Методы расчета градиента давления двухфазного потока при течении в малых каналах // Вестник Международной академии холода. 2012. № 1. С. 3–10.

11. Пронин В.А., Шляховецкий Д.В. Герметичный компрессор на диоксиде углерода для установки экстракции растительного сырья // Вестник Международной академии холода. 2007. № 2. С. 35–37.

12. Кудрявцева И.В., Рыков А.В., Рыков В.А., Рыков С.В. Единое неаналитическое уравнение состояния перфторпропана, удовлетворяющее масштабной теории критических явлений // Вестник Международной академии холода. 2013. № 3. С. 22–26.

13. Кудрявцева И.В., Рыков А.В., Рыков В.А. Метод расчета равновесных свойств сверхкритических флюидов, используемых в СКФ-технологиях // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2. С. 29.

14. Кудрявцева И.В., Рыков А.В., Рыков В.А. Новое уравнение для «кажущейся» теплоты парообразования // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2. С. 30.

15. Пронин В.А., Молодов М.А., Шпилин Д.И. Газовоздушные выбросы пищевых предприятий и способы их устранения // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2. С. 36.