

УДК: 628.517.4. 699.842
OECD: 2.03 PU

Экспериментальные исследования эффективности мягкого вибропоглощающего покрытия с большими воздушными полостями

Кирпичников В.Ю.¹, Смольников В.Ю.², Старостин А.П.³, Олейников А.Ю.^{4*}
¹Д.т.н., профессор, ²инженер 1-ой категории, ³начальник сектора, ⁴к.т.н., доцент
^{1,2}ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, РФ
^{1,4}Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ
^{2,3}ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Одним из основных средств уменьшения вибрации и, как следствие, шумоизлучения инженерных конструкций являются мягкие вибропоглощающие покрытия (ВПП). Они представляют собой слой вязкоупругого материала. Из-за малой толщины резонансные частоты находятся в области высоких частот, есть необходимость снижать эти частоты, для большей эффективности работы покрытия в низкочастотном диапазоне. Для этой цели предлагается использовать тонкое вибропоглощающее покрытие с большими воздушными полостями. В работе проведено экспериментальное определение эффективности уменьшения низкочастотных уровней вибрации демпфируемой пластины покрытием с воздушными полостями порядка 32% от объема. Исследование показало, что создание в мягком ВПП из резины воздушных полостей больших размеров к заметному улучшению его эффективности на низких резонансных частотах колебаний демпфируемой пластины не приводит и существенно уменьшает эффективность на частотах, где она имеет наибольшее значение. Подтверждены расчетные оценки параметров покрытия и наибольшего значения коэффициента потерь пластины с большими воздушными полостями.

Ключевые слова: вибрация, шумоизлучение, коэффициент потерь, вибропоглощающее покрытие, эффективность вибропоглощения, большие воздушные полости.

Experimental investigations of soft vibration absorbing coating effectiveness with large air cavity

Kirpichnikov V.Yu.¹, Smolnikov V.Yu.², Starostin A.P.³, Oleinikov A.Yu.^{4*}
¹DSc, Professor, ²1st category engineer, ³Head of Sector, ⁴PhD, Associate Professor
^{1,4}Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia
^{2,3}Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia

Abstract

One of the main means of reducing vibration and, as a consequence, noise emission from engineering structures is soft vibration-absorbing coatings (VAC). They are a layer of viscoelastic material. Due to the small thickness of the resonant frequencies are in the region of high frequencies, there is a need to reduce these frequencies, for greater efficiency of the coating. For this purpose, it is proposed to use a thin vibration absorbing coating with a large air cavity. In this paper, an experimental determination of the effectiveness of reducing

the low-frequency vibration levels of a damped plate by a coating with air cavities of about 32% of the volume has been carried out. The study showed that the creation of air cavities of large sizes in a soft rubber runway does not lead to a noticeable improvement of its efficiency at low resonance frequencies of vibrations of the damped plate and significantly reduces the efficiency at frequencies where it has the greatest value. Calculated estimates of the coating parameters and the largest value of the loss factor of the plate with large air cavities are confirmed.

Keywords: vibration, noise emission, loss factor, vibration-absorbing coating, vibration absorption efficiency, large air cavity.

Введение

Одним из основных средств уменьшения вибрации и, как следствие, шумоизлучения инженерных конструкций являются мягкие вибропоглощающие покрытия (ВПП). Они представляют собой слой вязкоупругого материала – преимущественно резины, в котором при поперечных перемещениях поверхности изгибно-колеблющейся конструкции возникают упругие волны по толщине [1, 2].

При небольших толщинах подобного покрытия из существующих резин резонансные частоты упругих колебаний слоя, на которых он имеет наибольшую эффективность, оказываются достаточно высокими [3, 4].

Для снижения этих частот и расширения диапазона работы мягкого покрытия в низкочастотную область в нем формируют воздушные полости. Коэффициент относительного объема воздушных полостей в покрытиях из резины для придания им лучших акустических свойств – составляет обычно 10%. К значительному снижению низшей резонансной частоты f_r упругих колебаний мягких покрытий малой толщины такие воздушные включения не приводят. Эффективность уменьшения ими, даже при больших толщине и массе, уровней вибрации и шумоизлучения на низших резонансных частотах колебаний пластинчатых элементов инженерных конструкций оказывается малой.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение эффективности уменьшения низкочастотных уровней вибрации демпфируемой пластины тонким вибропоглощающим покрытием с коэффициентом относительного объема воздушных полостей порядка 32%.

1. Параметры демпфируемой конструкции и ВПП

В качестве демпфируемой конструкции использовалась закрепленная на монтажной рамке стальная пластина толщиной $h = 3$ мм с размерами в плане 522x371 мм. Масса пластины составляет 4,5 кг.

В ходе испытаний выполнялись измерения уровней входной вибровозбудимости A/F , дБ, пластины при ее ударном возбуждении миниатюрным вибромолотком с установленным на нем датчиком силы. Возбуждение осуществлялось со стороны, свободной от покрытия.

Под входной вибровозбудимостью понимается величина $A/F = 20 \lg(AF_0/F\alpha)$, где A – уровень ускорения, m/c^2 , в точке удара силой F , Н; α – пороговый уровень виброускорения, $10^{-6} m/c^2$; $F_0 = 1$ Н. Уровни входной вибровозбудимости пластины A/F регистрировались в узких полосах частот ($\Delta f = 1$ Гц) в диапазоне от 0 Гц до 6400 Гц. Основное внимание при анализе было уделено диапазону низких и средних звуковых частот от 0 до 1600 Гц.

Измерения выполнялись в геометрическом центре (ГЦ) пластины, в двух точках, находящихся на одинаковом наименьшем расстоянии от ГЦ и ее длинной и короткой кромок, а также в точке, расположенной на равном расстоянии от ГЦ и одного из углов пластины. Каждая из точек измерения находилась в зоне пучности формы одной из низших резонансных частот изгибных колебаний пластины. Схема расположения точек измерений A/F и установленного на пластине покрытия изображена на рис. 1.

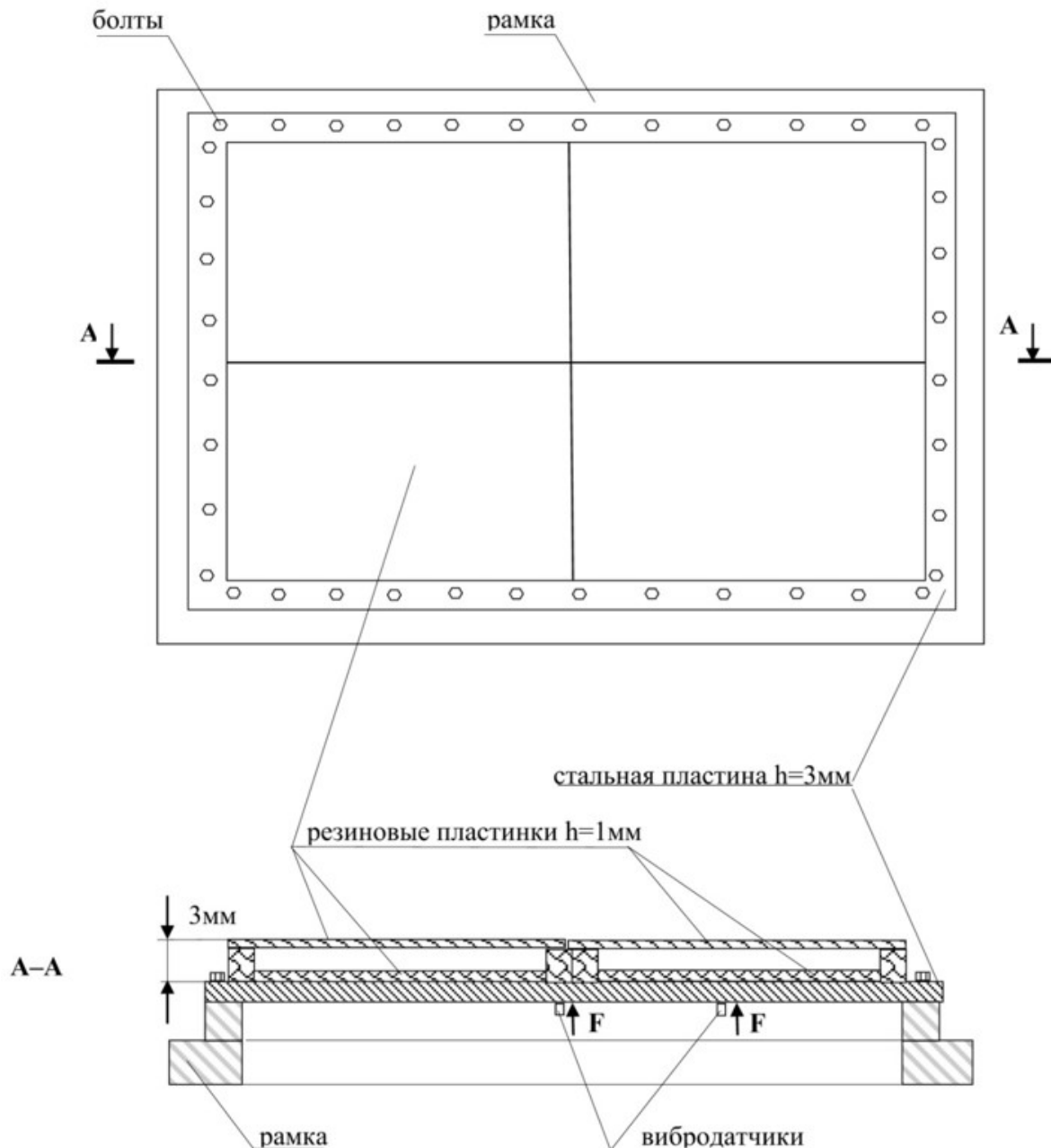


Рис. 1. Схема расположения покрытия, а также точек измерения и возбуждения вибрации

Покрытие было выполнено из четырех одинаковых, рядом расположенных элементов, каждый из которых состоит из двух резиновых слоев толщиной 1 мм с промежуточной воздушной полостью такой же толщины. Кромки слоев были соединены между собой клеевым способом с использованием резиновых полос шириной 10 мм.

Масса покрытия определялась с использованием его объема и плотности ρ_2 , вычисленной по формуле:

$$\rho_2 = \rho_1 V_1 / (V_1 + V_2),$$

где V_1 и V_2 – объемы резины и воздуха в покрытии, равные примерно $0,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ и $0,19 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ соответственно; ρ_1 – плотность резины марки 51-2701, 1150 кг/м³.

При $\rho_2 = 785 \text{ кг/м}^3$ масса покрытия (0,47 кг) составила $\sim 10,4\%$ массы демпфируемой пластины.

Необходимый для дальнейших оценок характеристик покрытия модуль его объемной упругости был вычислен с использованием формулы [5]:

$$E = \frac{V_1 + V_2}{V_1/E_1 + V_2/K}, \quad (1)$$

где в качестве модуля упругости E_1 резины марки 51-2701 принималась его измеренная величина $2,25 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $K = 1,4 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – модуль объемной упругости воздуха.

Величина E оказалась равной $\sim 4,4 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Расчетное значение скорости распространения волн сжатия в ВПП составило 23,7 м/с. Низшая резонансная частота упругих колебаний в направлении его толщины $f_p = C/4h$ оказалась равной 1975 Гц. (Толщина слоя указанной резины без воздушных включений с таким же значением низшей резонансной частоты f_p упругих колебаний в направлении его толщины превышает толщину испытываемого ВПП в ~ 6 раз).

2. Результаты определения эффективности ВПП

На рис. 2 приведены типовые узкополосные спектры входной вибровозбудимости A/F пластины, измеренной в ее геометрическом центре (ГЦ) при отсутствии и наличии ВПП описанной конструкции. Значения эффективности уменьшения уровней резонансных максимумов в спектрах A/F приведены на рис.3. Кривой соединены средние, по точкам измерения, величины эффективности покрытия на резонансных частотах колебаний пластины без покрытия. Уровни четырех низших резонансных максимумов облицованной ВПП пластины уменьшились по сравнению с уровнями максимумов A/F пластины без ВПП в среднем по частотам и точкам измерения на 6 дБ. Соответствующая средняя по точкам измерения величина эффективности ВПП в диапазоне, ограниченном сверху частотой 1600 Гц, составила $\sim 9,2 \text{ дБ}$ (рис.3). Наибольшая эффективность покрытия была зарегистрирована на резонансных частотах 1041 Гц (14 дБ), 1093 Гц (12 дБ), 1308 Гц (13 дБ), 1327 Гц (17 дБ) и 1348 Гц (13 дБ).

Для приведенных частот были определены соотношения длин продольных (скорость $\sqrt{E_1/\rho_1} = 140 \text{ м/с}$) и сдвиговых (скорость $\sqrt{G_1/\rho_1} = 81 \text{ м/с}$) волн в резине с длинами изгибных волн в демпфируемой пластине. (Модуль сдвига G_1 считался равным $0,33E_1$).

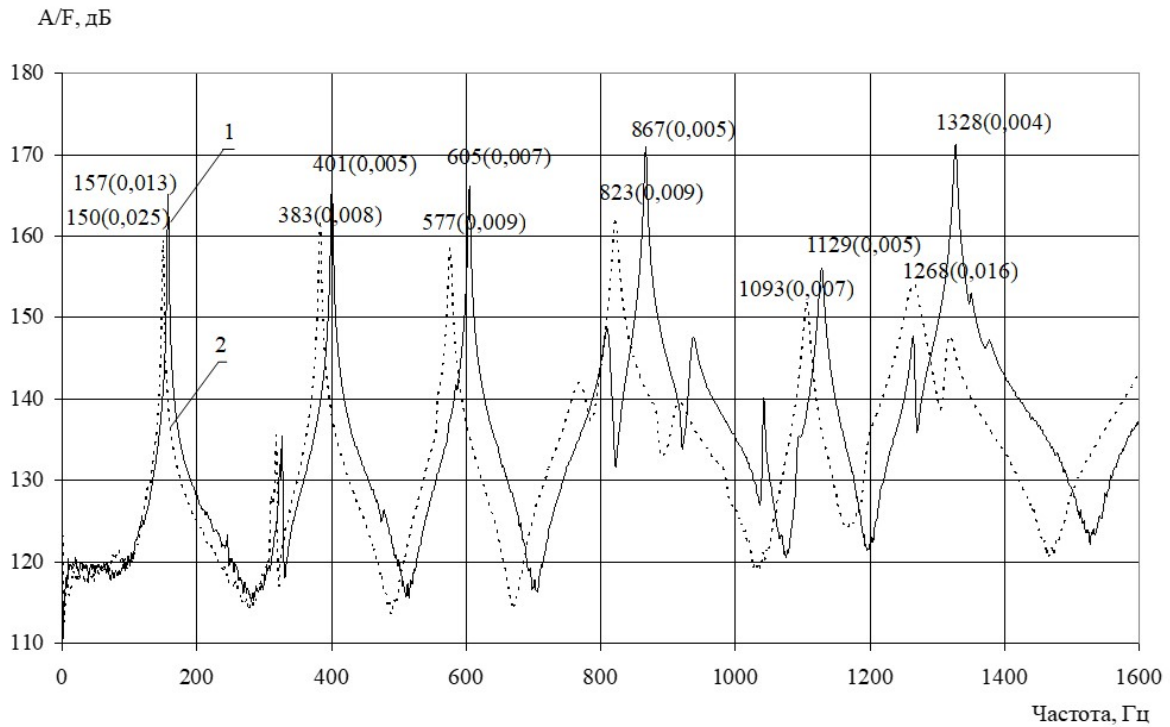


Рис. 2. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины в ГЦ при отсутствии (кривая 1) и наличии (кривая 2) ВПИ

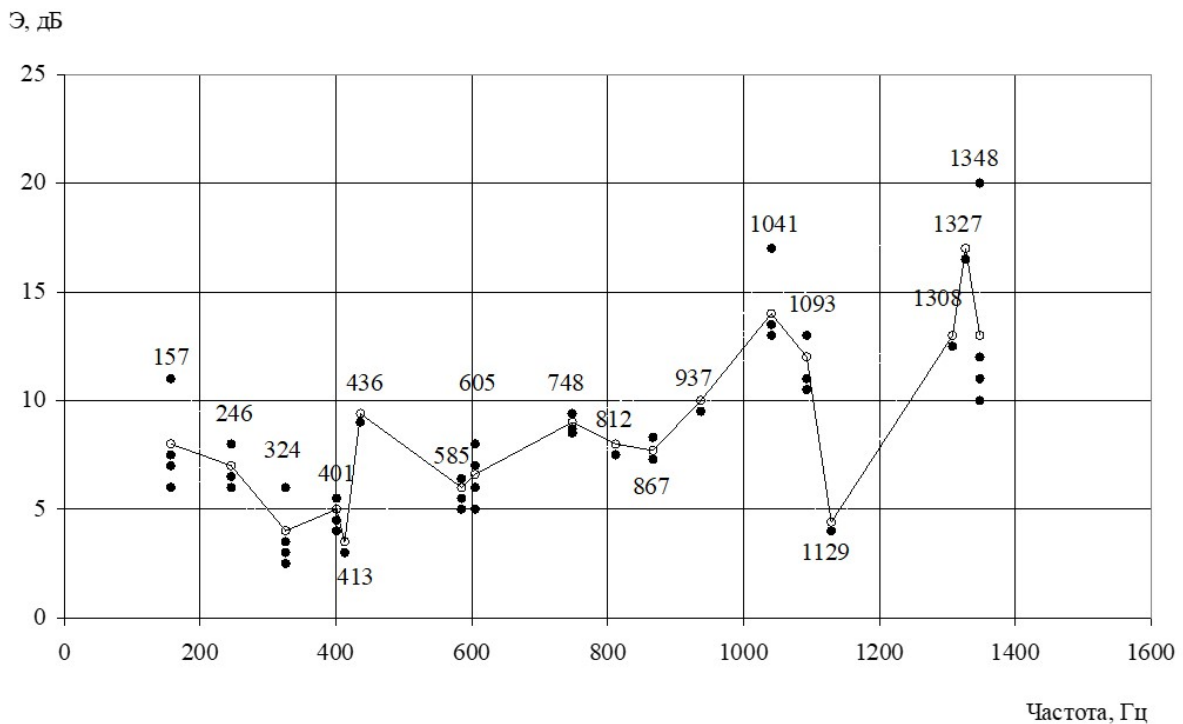


Рис. 3. Эффективность уменьшения уровней резонансных максимумов входной вибровозбудимости пластины покрытием

Длины изгибных волн в стальной пластине вычислялась с использованием формулы для скорости их распространения $C_u = 0,54\sqrt{\omega h C_{np}}$ ($\omega = 2\pi f$ – круговая частота; $h = 3 \cdot 10^{-3}$ м – толщина пластины; $C_{np} = 5000$ м/с – скорость продольных волн в стали). Оказалось, что в диапазоне частот 1041–1348 Гц с наибольшей эффективностью ВПП длины изгибных волн в пластине превосходит длины продольных и сдвиговых волн в резине примерно в 1,2 – 1,4 и 2,1 – 2,4 раза соответственно.

Отметим, что все расчетные величины длин волн в указанном диапазоне не только в резине, но и в стальной пластине были меньше размеров в плане элементов испытанного покрытия [6]. Это косвенно свидетельствует, в частности, о малом влиянии низших продольного и сдвигового резонансов резинового листа с размерами воздушных полостей на процессы создания покрытием наибольших потерь колебательной энергии в пластине в диапазоне частот (1041 – 1348) Гц.

Результаты измерений узкополосных спектров A/F были использованы для экспериментально-расчетного определения потерь колебательной энергии пластины с покрытием. Значения коэффициента потерь η вычислялись с использованием формулы $\eta = \Delta f_p / f_p$, где Δf_p – ширина резонансного максимума на частоте f_p на уровне -3 дБ от его наибольшего значения. Согласно вычислениям значения η пластины без ВПП находятся в пределах от 0,004 до 0,013, а пластины с ВПП – от 0,07 до 0,025. Средние величины η , полученные по шести наиболее интенсивным резонансным максимумам A/F в геометрическом центре пластины при отсутствии и наличии ВПП, оказались равными 0,006 и 0,014 соответственно.

Оценка коэффициента потерь η колебательной энергии в пластине с мягким покрытием, имеющим согласно [1] наибольшее значение на низшей резонансной частоте его колебаний по толщине, выполнялась с использованием приближенной формулы, предлагаемой для ВПП с большими воздушными полостями

$$\eta = \frac{0,1\eta_p}{1 + 1,23\mu_{12}\eta_p^2}, \quad (2)$$

где μ_{12} – соотношение (9,61) масс единицы поверхности демпфируемой пластины и покрытия; η_p – коэффициент потерь энергии в резине, 0,55; множитель 0,1 получен экспериментально.

Расчетная величина $\eta = 0,012$ оказалась близкой к наибольшему (0,016) в диапазоне частот 1041–1348 Гц экспериментальному значению η на резонансной частоте 1268 Гц изгибных колебаний пластины с покрытием.

Расчетная величина η пластины с ВПП из той же резины без воздушных полостей или с обычным коэффициентом относительного объема воздушных полостей (10%), определяемая по формуле без поправочного коэффициента перед η_p в числителе [1], примерно на порядок больше приведенного значения $\eta = 0,012$. Однако повышенные потери колебательной энергии будут иметь место на частотах приблизительно в 2 раза более высоких, чем у ВПП с большими воздушными полостями.

С учетом изложенного можно сделать вывод, что создание в мягком ВПП из резины воздушных полостей больших размеров к заметному улучшению его эффективности на низких резонансных частотах колебаний демпфируемой пластины не приводит и существенно уменьшает эффективность на частотах, где она имеет наибольшее значение.

Заключение

К основным результатам выполненной работы отнесем следующие:

– получены средние по точкам измерения и резонансным частотам диапазона 0 – 1600 Гц величины эффективности (8,5 дБ) покрытия и коэффициента потерь (0,014) колебательной энергии облицованной пластины;

– выполнены расчетные оценки параметров покрытия и наибольшего значения коэффициента потерь пластины при его наличии, удовлетворительно совпавшего с экспериментальной величиной η при использовании формулы, предлагаемой для ВПП с большими воздушными полостями.

Содержащиеся в статье результаты могут быть использованы при разработке, в части оценки параметров и эффективности, мягких вибропоглощающих покрытий на основе резины с большими воздушными полостями, например, при их заполнении дополнительными средствами вибропоглощения для существенного повышения эффективности покрытия.

Список литературы

1. Никифоров А.С. Вибропоглощение на судах. Л.: Судостроение, 1979.
2. Ningdong Hu, Jun Jin, Wentao Zou¹, Weicai Peng, Hongping. Sound absorption mechanism of underwater anechoic coating with spherical cavities Hu // Journal of Mechanics, 2024, 40, 68–78 <https://doi.org/10.1093/jom/ufae009>
3. M.A. Kuczmarski, J.C. Johnston, “Acoustic absorption in porous materials,” NASA/TM–2011-216995, 2011. [Online] Available: www.sti.nasa.gov Accessed: 27 April 2021
4. Кирпичников В.Ю. Об эффективности вибропоглощающих покрытий / В.Ю. Кирпичников, И.О. Малинин, А.Ю. Олейников // Noise Theory and Practice. – № 10(2). – 2024. – С. 29-43.
5. Кузьмичев М.Н. Зависимость шумозаглушающей эффективности конструкций с покрытиями от их звукоизолирующих и отражающих свойств // Техническая акустика. Т. III. Вып. 1–2 (7–8). 1994. С. 14–17. <https://doi.org/10.1093/jom/ufae009>
6. Кирпичников В.Ю., Петров А.А., Олейников А.Ю. Экспериментальные исследования эффективности резонансных пластинчатых (полосовых) вибропоглощителей // Noise Theory and Practice. – № 8(3). – 2022. – С. 7-15.5

References

1. Nikiforov A.S. Vibration absorption on ships. L.: Sudostroenie, 1979.
2. Ningdong Hu, Jun Jin, Wentao Zou¹, Weicai Peng, Hongping. Sound absorption mechanism of underwater anechoic coating with spherical cavities Hu // Journal of Mechanics, 2024, 40, 68–78 <https://doi.org/10.1093/jom/ufae009>
3. M.A. Kuczmarski, J.C. Johnston, “Acoustic absorption in porous materials,” NASA/TM-2011-216995, 2011. [Online] Available: www.sti.nasa.gov Accessed: April 27, 2021
4. Kirpichnikov V.Yu. On the effectiveness of vibration-absorbing coatings / V.Yu. Kirpichnikov, I.O. Malinin, A.Yu. Oleinikov // pp. 29-43 // Noise Theory and Practice. – N 10(2). – 2024. – P. 29-43.

5. Kuzmichev M.N. Dependence of noise-absorbing efficiency of structures with coatings on their sound-insulating and reflecting properties // *Technical Acoustics*. VOL. III. Vol. 1-2 (7-8). 1994. C. 14-17.

6. Kirpichnikov V.Yu., Petrov A.A., Oleynikov A.Yu. Experimental studies of the effectiveness of resonant plate (strip) vibration absorbers // *Noise Theory and Practice*. – No. 8(3). – 2022. – P. 7-15.