

УДК: 534.13
OECD: 2.03 PU

Уменьшение вибрации и шумоизлучения пластины армированным вибропоглощающим покрытием на основе полимерной пленки

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

¹Д.т.н., профессор, профессор кафедры «Экология и производственная безопасность»,

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

³К.т.н., доцент, доцент кафедры «Экология и производственная безопасность»,

^{1,3}Балтийский Государственный Технический Университет

«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,

^{1,2,3} г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Объектом является пластина (крышка) малогабаритного шумозаглушающего кожуха. Выполнено экспериментальное и расчетное определение эффективностей уменьшения вибрации и шумоизлучения пластины установленным на ее внешнюю поверхность армированным вибропоглощающим покрытием (АВП) на основе полимерной пленки. Для этого выбраны измеренные частотные спектры вибрации и шумоизлучения пластины при отсутствии и наличии покрытия, а также оценки его эффективностей. Результатом являются полученные экспериментальные и расчетные величины эффективностей уменьшения уровней вибрации и шумоизлучения пластины покрытием при пространственном (громкоговоритель) и сосредоточенном (вибромолоток) возбуждении пластины. Представлено сравнение величин эффективностей уменьшения вибрации и шумоизлучения пластины двумя вариантами АВП. Приведены формулы для выполнения оценок величин эффективностей АВП.

Ключевые слова: кожух, пластина, вибрация, шумоизлучение, армированное вибропоглощающее покрытие, эффективности, измерение, расчетная оценка.

Reduction of vibration and noise emission of the plate with a reinforced vibration-absorbing coating based on a polymer film

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

¹DSc, Professor, Professor of the Department 'Ecology and industrial safety',

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

³PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department 'Ecology and industrial safety',

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

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

Abstract

The object is a plate (cover) of a small-sized noise-attenuating casing. An experimental and computational determination of the effectiveness of reducing vibration and noise emission of a plate by installing a reinforced vibration-absorbing coating (VAC) based on a polymer film installed on its outer surface was carried out. For this purpose, the measured frequency spectra of vibration and noise emission of the plate were selected in the absence and presence of a coating, as well as estimates of its effectiveness. The result is the obtained experimental and calculated values of the efficiency of reducing the levels of vibration and

*E-mail: ksiombarg1@yandex.ru (Кудаев А.В.)

noise emission of the plate by the coating during spatial (loudspeaker) and concentrated (vibrating hammer) excitation of the plate. A comparison of the efficiency values of reducing vibration and noise emission of a plate by two VAC options is presented. Formulas are given for estimating the efficiency values of VAC.

Keywords: casing, plate, vibration, noise emission, reinforced vibration-absorbing coating, efficiency, measurement, calculation estimate.

Введение

Одним из основных средств уменьшения уровней вибрации и шумоизлучения различного рода инженерных конструкций являются вибропоглощающие покрытия (ВПП). Применяют преимущественно три типа ВПП: мягкие, жесткие и армированные. Покрытия отличаются друг от друга конструктивным оформлением, а также инерционно-жесткостными параметрами вибропоглощающего вязкоупругого материала и его неодинаковой деформацией [1].

В последние годы все большее применение находят армированные вибропоглощающие покрытия (АВП) на основе поливинилацетата [2,3]. Согласно результатам многочисленных измерений эти покрытия даже при малых толщине и массе эффективно демпфируют конструкции в широком диапазоне частот их изгибных колебаний.

Несмотря на то, что АВП с диссипативным слоем из указанного материала чаще используются для уменьшения уровней шумоизлучения конструкций, а не их вибрации, опубликованные материалы с результатами эффективности этих средств по уменьшению уровней как вибрации, так и излучения конструкций в окружающую среду до настоящего времени отсутствуют.

Вместе с тем актуальность соответствующих исследований очевидна. Действительно, подобные АВП являются высокоэффективными и малогабаритными средствами уменьшения вибрации конструкций, порождающей их шумоизлучение, в диапазоне низких и средних звуковых частот, на которых другие существующие средства вибро- и звукопоглощения при много бóльших толщине и массе не работают или имеют значительно меньшую эффективность. На отсутствие и малую эффективность существующих ВПП по уменьшению уровней шумоизлучения пластинчатой конструкции, эффективно уменьшающих уровни ее вибрации на частотах меньших частоты совпадения, указывалось, например, в работе [4].

Целью настоящей работы является исследование эффективностей уменьшения различными вариантами АВП уровней как вибрации, так и шумоизлучения крышки шумозаглушающего кожуха, являющейся согласно экспериментальным исследованиям его основным конструктивным излучающим элементом.

1. Экспериментальная установка. Средства уменьшения вибрации и шума

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием кожуха (рис. 1), корпус которого изготовлен из стальных уголков ($20 \times 20 \times 1,5$ мм) и закрепленных на них стальных пластин. Размеры в плане пластин боковых стенок кожуха равняются $0,3 \times 0,5$ м, а дна и крышки – $0,5 \times 0,5$ м. Толщина пластин стенок и дна составляет 2 мм, а крышки – 1 мм. Каждая пластина стенок подкреплена пятью вертикальными (4×40 мм) и одним горизонтальным (4×60 мм) прямоугольными ребрами жесткости, а пластина дна – тремя стальными уголками ранее указанного размера и перекрестным

ребром жесткости с размерами поперечного сечения 4×60 мм.

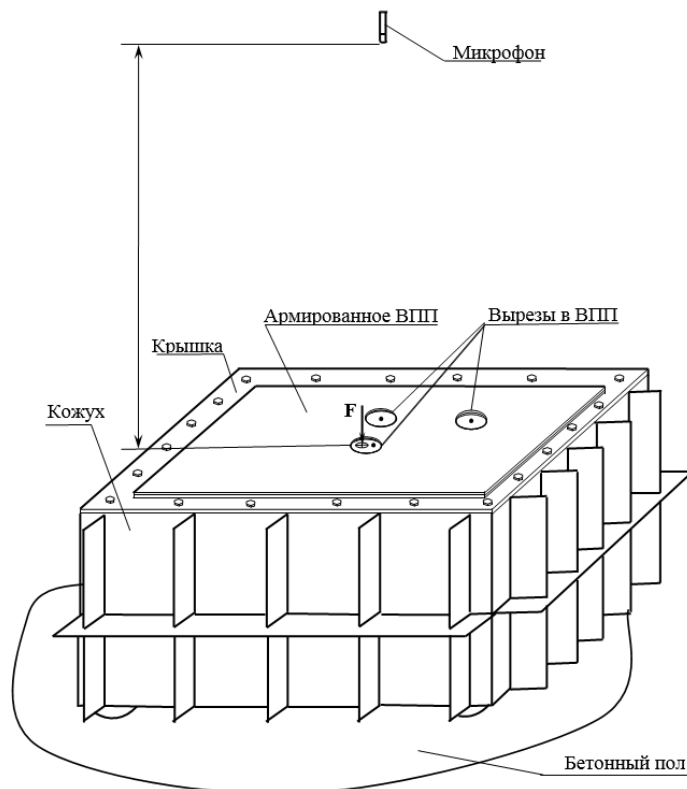


Рис. 1. Схема расположения точек измерения вибрации и звукового давления крышки кожуха

Влияние шумоизлучения стенок и дна на уровни звукового давления над крышкой было исключено внедрением нескольких противошумовых мероприятий. Пластины облицовывались изнутри армированным вибропоглощающим покрытием, состоящим из диссипативного слоя пористой резины толщиной 10 мм и стального листа толщиной 1 мм. На стальные листы АВП был установлен звукопоглощающий материал толщиной 30 мм с плотностью порядка 40 кг/м^3 .

Для уменьшения возможного вибровозбуждения и последующего шумоизлучения бетонного пола кожух был установлен на четырёх амортизаторах с собственной частотой вертикальных колебаний при номинальной нагрузке ~ 20 Гц.

Источниками вибрации и шумоизлучения крышки – основного излучателя шума, снижающего эффективность кожуха, – последовательно являлись громкоговоритель (пространственное возбуждение) с диаметром рупора 360 мм и миниатюрный вибромолоток (сосредоточенное возбуждение).

Плоскость рупора громкоговорителя располагалась от крышки на расстоянии ~ 130 мм, а его ось совпадала с нормалью к поверхности крышки, проведенной из ее геометрического центра (ГЦ).

Ударное возбуждение крышки миниатюрным вибромолотком осуществлялось в ее ГЦ, а также в точках, находящихся на одинаковом кратчайшем расстоянии от ГЦ и одной из кромок, а также от ГЦ и одного из углов крышки. Над соответствующими точками возбуждения и измерения вибрации крышки в наносимых на нее покрытиях выполнялись отверстия диаметром 10 мм.

Измерения уровней шумоизлучения (звуковых давлений) крышки выполнялись в точках на нормали, проведенной из геометрического центра крышки, с расстояниями 0,5

и 1,0 м от ее поверхности.

Последовательно испытывались два типа АВП на внешней поверхности крышки кожуха, отличающихся толщиной стального армирующего листа, равной 0,18 мм (АВП1) и 0,56 мм (АВП2). В обоих покрытиях диссипативным слоем была полимерная пленка ВПС-2,5 из поливинилацетата толщиной 0,5 мм с лучшими вибродемпфирующими свойствами в диапазоне температур примерно от 10 до 30°C. Температура в лабораторном помещении, где проводились испытания, равнялась ~25°C. Масса АВП1 и АВП2 составляла примерно 15 и 35% массы крышки соответственно.

2. Результаты экспериментального определения эффективностей АВП

На начальном этапе измерений определялись вибрационные характеристики крышки при ее закреплении на корпусе кожуха.

При возбуждении как вибромолотком, так и громкоговорителем частота низшего максимума в спектрах вибровозбудимости A/F , дБ, и вибрации A , дБ, крышки была равной ~54 Гц (рис. 2).

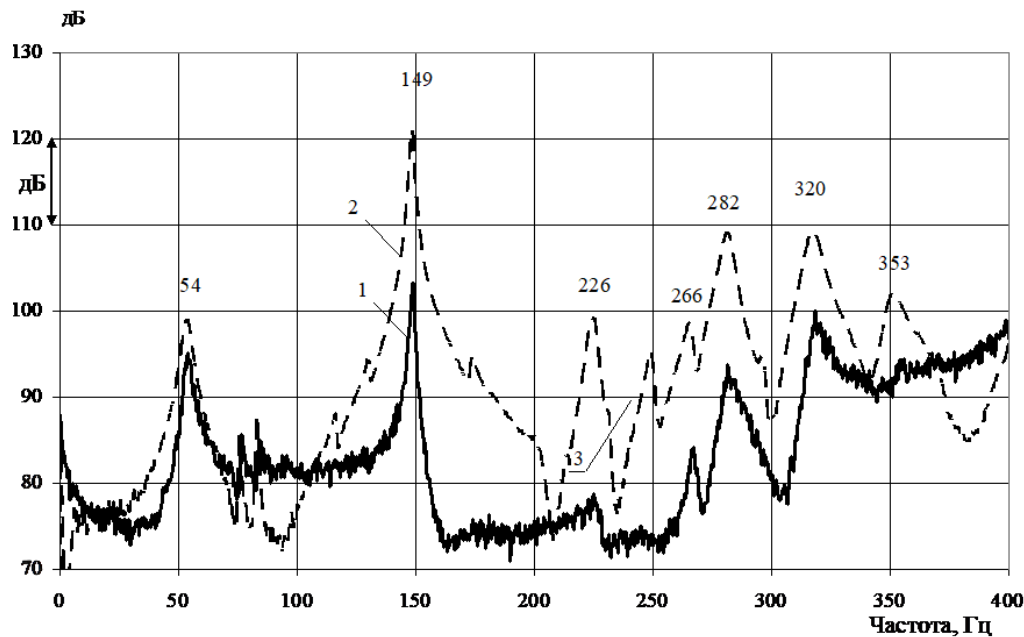


Рис. 2. Спектры входной вибровозбудимости при ударах вибромолотком (1) и вибрации при работе громкоговорителя (2) крышки в геометрическом центре

Наибольшие уровни A/F , дБ, и A , дБ, были зарегистрированы на частоте 149 Гц. С высокой вероятностью именно на ней имело место совместное возникновение резонансных явлений при колебаниях крышки и воздушного объема кожуха.

Экспериментально-расчетная оценка коэффициента потерь η колебательной энергии в крышке проводилась с использованием формулы:

$$\eta = \Delta f_p / f_p, \quad (1)$$

где Δf_p – ширина максимума на частоте f_p в спектрах входной вибровозбудимости или вибрации на уровне -3 дБ от его наибольшего уровня.

Определялись средние значения η по двадцати и тринадцати наиболее интенсивным максимумам в вибрационных спектрах A/F и A , соответственно, в

трех точках измерения. Их величины при возбуждении крышки вибромолотком и громкоговорителем оказались равными 0,030 и 0,034 соответственно.

Последовательная облицовка наружной поверхности крышки приводила к уменьшению уровней как ее вибрационных характеристик, так и шумоизлучения. В качестве примера на рис. 3 приведены узкополосные спектры A/F , дБ, в Гц возбуждаемой вибромолотком крышки при отсутствии (кривая 1) и наличии (кривая 2) на ней покрытия АВП2.

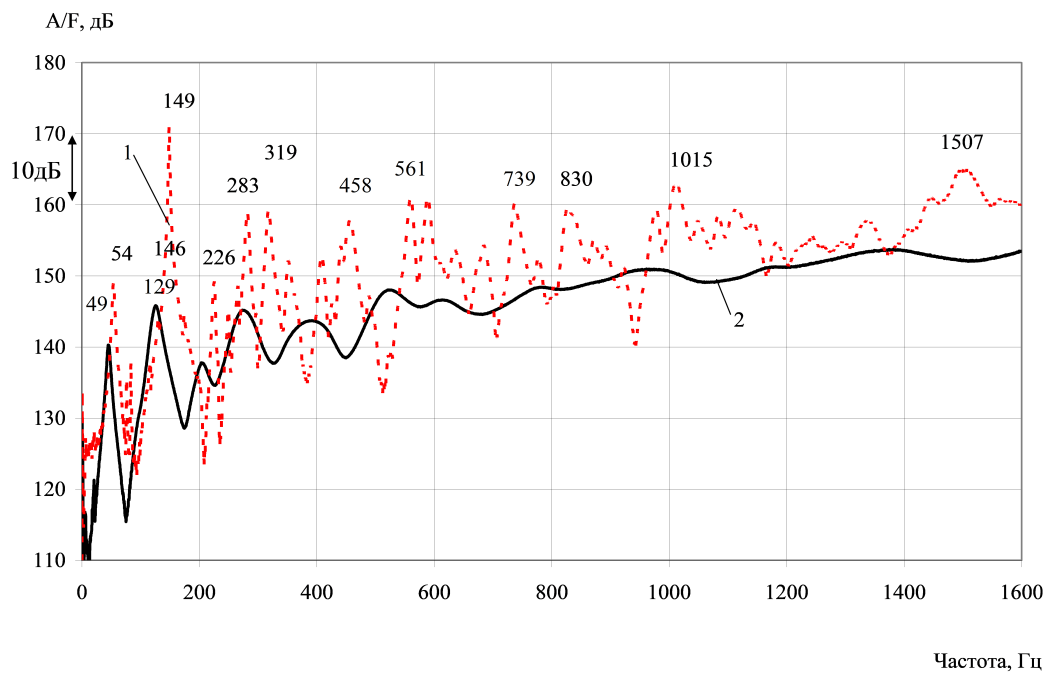


Рис. 3. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости в Гц крышки, возбуждаемой вибромолотком, при отсутствии (1) и наличии (2) АВП2

Анализ показал, что средние по частотам и точкам измерения величины уменьшения покрытиями уровней вибрации \mathcal{E}_B двадцати наиболее интенсивных максимумов в спектрах входной и переходной вибровозбудимости A/F , дБ, крышки при ее возбуждении вибромолотком равняются 12 дБ (АВП1) и 17 дБ (АВП2).

Аналогичные средние значения эффективности \mathcal{E}_B покрытий, определенные по величинам уменьшения уровней вибрации тринадцати наиболее интенсивных максимумов в спектрах вибрации крышки, измеренной в трех точках при возбуждении громкоговорителем, составили 10 дБ (АВП1) и 14 дБ (АВП2).

Эффективность уменьшения покрытиями уровней шумоизлучения $\mathcal{E}_Ш$, дБ, крышки при ударах вибромолотком определялась при ее возбуждении в каждой из трех ранее указанных точек. Усредненная по тринадцати наиболее интенсивным максимумам в спектрах шумоизлучения и двум точкам измерения уровней звукового давления эффективность $\mathcal{E}_Ш$ покрытий составила 9 дБ (АВП1) и 12 дБ (АВП2). Средние значения эффективности $\mathcal{E}_Ш$ покрытий при работе громкоговорителя, определенные по шести наиболее выраженным максимумам в спектрах шумоизлучения крышки и точкам измерения, оказались равными 5 дБ (АВП1) и 7 дБ (АВП2).

Все полученные значения эффективности шумозаглушения $\mathcal{E}_Ш$ были меньше ранее приведенных значений уменьшения вибровозбудимости \mathcal{E}_B . Соответствующая разница при возбуждении крышки вибромолотком составила 3 дБ (АВП1) и 5 дБ (АВП2), а при работе громкоговорителя – 5 дБ (АВП1) и 7 дБ (АВП2).

Учитывая практическую важность акустических характеристик шумозаглушающих кожухов не только в узких, но и в более широких частотных полосах, были выполнены измерения уровней шумоизлучения крышки при отсутствии и наличии покрытий в третьоктавных полосах частот. Соответствующие частотные зависимости их эффективности шумозаглушения $\mathcal{E}_{\text{ш}}$ в диапазоне от 40 до 1250 Гц, определенной на расстоянии 1 м от крышки при работе громкоговорителя, приведены на рис. 4.

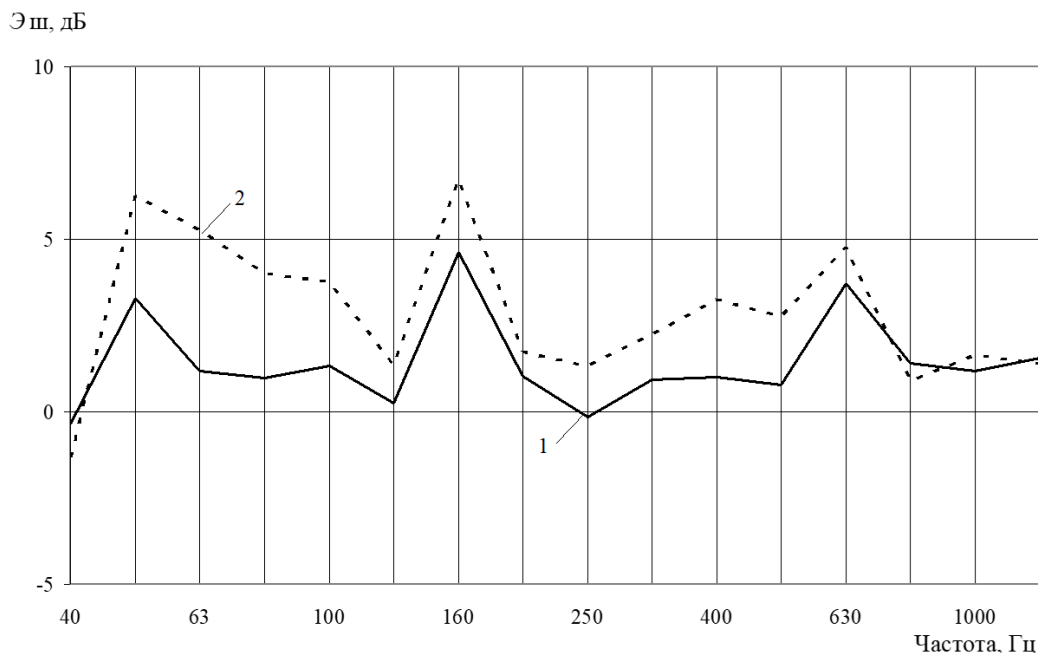


Рис. 4. Эффективность уменьшения третьоктавных уровней шумоизлучения крышки покрытиями АВП1 (1) и АВП2 (2) при работе громкоговорителя

Средние по третьоктавным полосам значения эффективности уменьшения уровней шумоизлучения крышки покрытиями составили ~ 2 дБ (АВП1) и 3 дБ (АВП2). В полосах со среднегеометрическими частотами 50, 160 и 630 Гц, содержащими наиболее интенсивные максимумы уровней звукового давления, эффективность покрытий находится в пределах от 3 до 7 дБ.

3. Расчетная оценка эффективностей покрытий

Экспериментальные значения эффективностей уменьшения покрытиями уровней максимумов в спектрах вибрации \mathcal{E}_V и шумоизлучения $\mathcal{E}_{\text{ш}}$ крышки были сопоставлены с их расчетными величинами.

Эффективность снижения вибраций \mathcal{E}_V покрытием определялись по формуле [5]:

$$\mathcal{E}_V = 20 \lg(\mu/4,5) - 20 \lg(\eta/\eta_0) + 23, \text{ дБ}, \quad (2)$$

где μ – относительная масса покрытия в процентах к массе демфируемой крышки; η – значение коэффициента внутренних потерь колебательной энергии крышки при отсутствии покрытия (η принималось равным 0,032 – среднему по двум вариантам возбуждения крышки значению); $\eta_0 = 0,003$. (Формула справедлива при $\mu > 4,5$). Расчетные значения эффективности \mathcal{E}_V покрытий составили 13 дБ (АВП1) и 20 дБ (АВП2).

Оба приведенных значения оказались близкими к их средним по частотам и точкам измерения величинам, находящимся при обоих вариантах возбуждения крышки

в пределах от 10 до 12 дБ (АВП1) и от 14 до 17 дБ (АВП2).

Вычисление величин эффективности АВП по уменьшению резонансных максимумов в спектрах шумоизлучения $\mathcal{E}_{\text{ш}}$, дБ, крышки выполнялось с использованием приближенной формулы, учитывающей снижение мощности шумоизлучения крышки за счет увеличения покрытием ее массы и потерь колебательной энергии [4]:

$$\mathcal{E}_{\text{ш}} = 20 \lg \left(\frac{\eta + \eta_{\text{И}}}{\eta_0 + \eta_{\text{И}0}} \right) + 20 \lg \frac{m}{m_0}, \text{ дБ}, \quad (3)$$

Сугубо ориентировочные величины $\eta_{\text{И}}$ и $\eta_{\text{И}0}$ характеризуют потери энергии крышки на шумоизлучение при наличии и отсутствии покрытия. При выполнении расчетной оценки $\mathcal{E}_{\text{ш}}$, дБ, использовались приближенные формулы $\eta_{\text{И}} = \rho c / \omega t$ и $\eta_{\text{И}0} = \rho c / \omega t_0$ (ρc – акустическое сопротивление воздуха; $\omega = 2\pi f$; t и t_0 – масса единицы поверхности крышки при наличии, 9 кг/м² (АВП1), 10,5 кг/м² (АВП2) и отсутствии, 7,8 кг/м², покрытия). Значения коэффициента потерь пластины при отсутствии (η_0) и наличии (η) покрытия принимались равными их усредненным измеренным величинам 0,032 и 0,11 (АВП1), 0,15 (АВП2).

Частотные характеристики расчетных и экспериментальных значений эффективности шумозаглушения $\mathcal{E}_{\text{ш}}$, дБ, покрытий АВП1 и АВП2 приведены на рис. 5 и 6. Точками на рисунках указаны экспериментальные значения. Согласование расчетных и экспериментальных данных на большинстве частот, учитывая приближенность оценок, можно считать удовлетворительным. Исключением является частота 149 Гц с наибольшим уровнем вибровозбудимости крышки при ударах по ней вибромолотком.

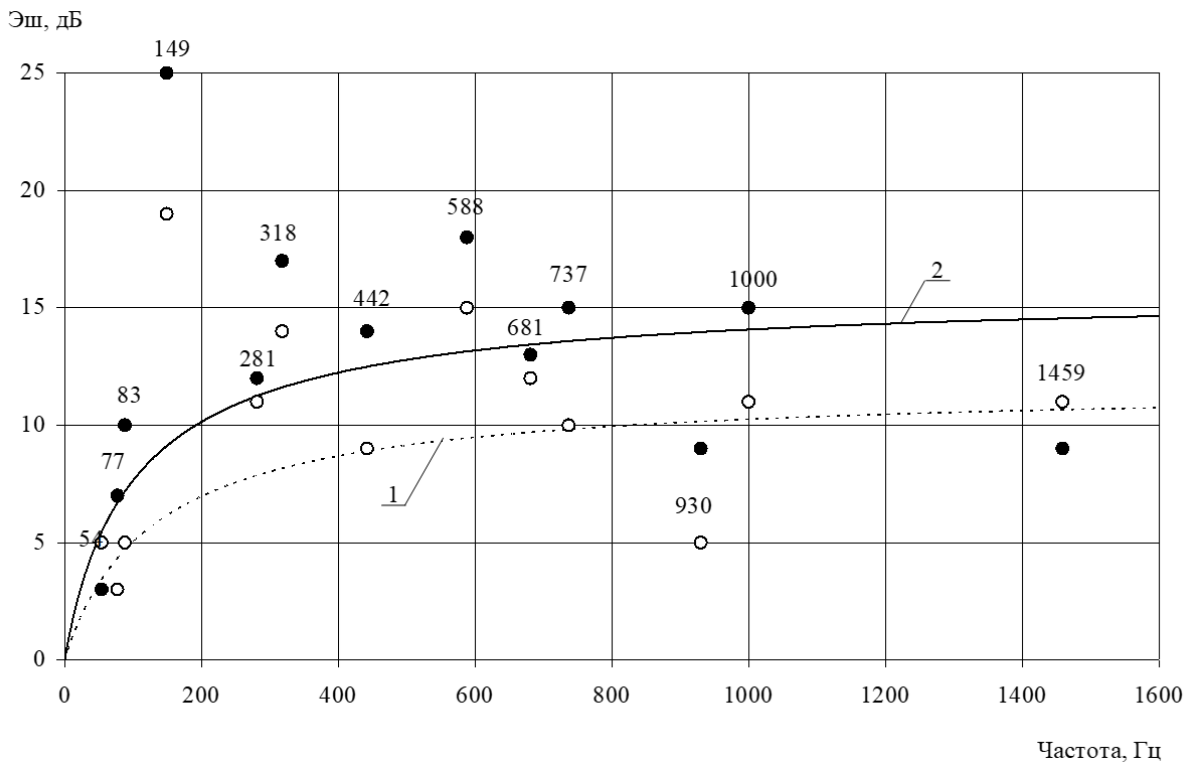


Рис. 5. Эффективность уменьшения уровней узкополосных максимумов в спектрах шумоизлучения крышки покрытиями АВП1 (○, кривая 1) и АВП2 (●, кривая 2) при ее возбуждении вибромолотком в геометрическом центре

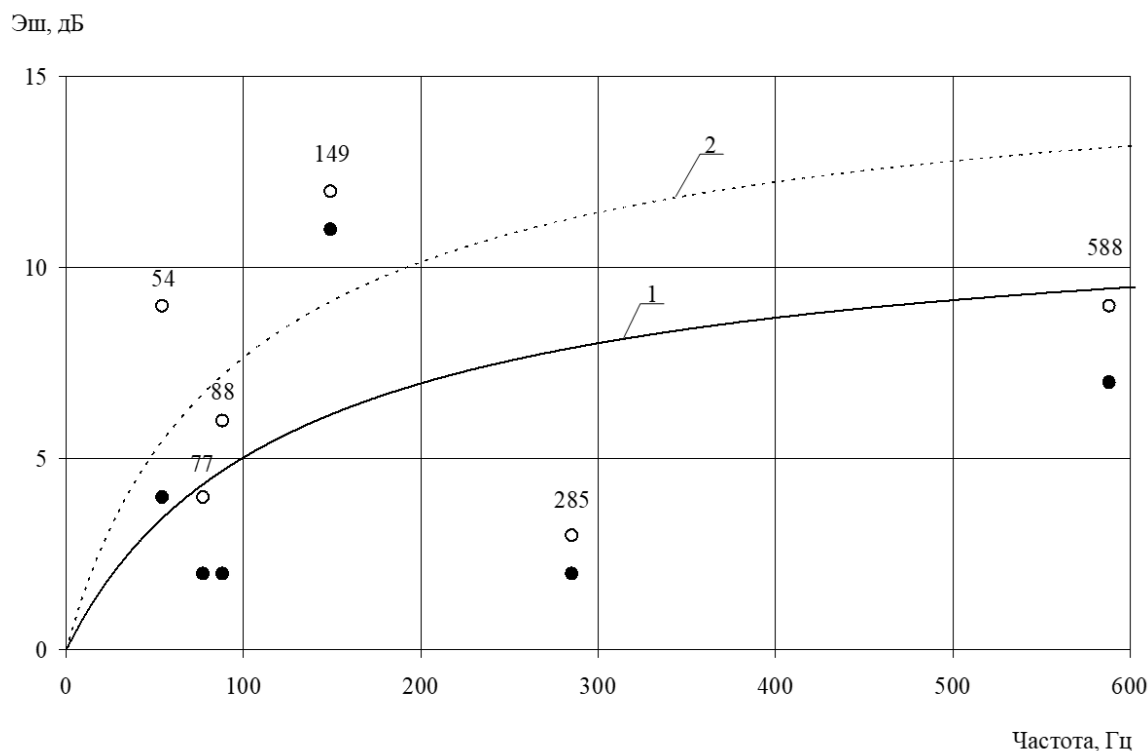


Рис. 6. Эффективность уменьшения уровней узкополосных максимумов в спектрах шумоизлучения крышки покрытиями АВП1 (● , кривая 1) и АВП2 (○ , кривая 2) при работе громкоговорителя

Заключение

К основным результатам работы отнесем следующие:

- выполнено экспериментальное определение эффективностей уменьшения уровней вибрации \mathcal{E}_B и шумозаглушения \mathcal{E}_Π крышки малогабаритного шумозаглушающего кожуха двумя последовательно устанавливаемыми вариантами армированного вибропоглощающего покрытия на основе полимерной пленки из поливинилацетата;

- получены средние по частотам и точкам измерения значения \mathcal{E}_B и \mathcal{E}_Π покрытий при сосредоточенном (вибромолоток) и пространственном (громкоговоритель) возбуждении крышки;

- показано, что при обеих нагрузках эффективность покрытий по уменьшению вибрации крышки превосходит их эффективность по уменьшению ее шумоизлучения;

- проведено сравнение средних экспериментальных значений \mathcal{E}_B и \mathcal{E}_Π с их оценочными величинами и установлено удовлетворительное согласование экспериментальных и расчетных данных.

Содержащиеся в статье результаты могут быть использованы при разработке и практическом применении армированных вибропоглощающих покрытий на основе поливинилацетата для эффективного уменьшения низкочастотных уровней вибрации и шумоизлучения инженерных пластинчатых конструкций различных видов транспорта.

Список литературы

1. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1990.
2. Алексеев С.А., Сятковский А.И. Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. № 6. С. 45–46.
3. Кирпичников В.Ю., Сятковский А.И., Шашурин А.Е., Кудаев А.В. Экспериментальные исследования эффективности вибропоглощающего покрытия с металлическим армирующим слоем различной толщины. *Noise Theory and Practice*. 2022; 1 (8). С. 29-34.
4. Канаев Б.А., Тартаковский Б.Д. Об оценке эффективности вибропоглощающих покрытий по излучению в окружающую среду // Вопросы судостроения. Серия: акустика. ЦНИИ «Румб». 1984. С. 63–66.
5. Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Смольников В.Ю. Малогабаритные средства вибродемпфирования толстолистовой пластинчатой конструкции // Труды Крыловского государственного научного центра. 2024. Вып. 4 (410).

References

1. Nikiforov A.S. Acoustic design of ship structures. Directory. L.: Shipbuilding, 1990.
2. Alekseev S.A., Syatkovsky A.I. Vibro-damping properties of polymer films // Shipbuilding. 2015. № 6. pp. 45–46.
3. Kirpichnikov V. Yu., Syatkovsky A.I., Shashurin A.E., Kudaev A.V. Experimental studies of the effectiveness of a vibration-absorbing coating with a metal reinforcing layer of various thickness. *Noise Theory and Practice*. 2022; 1 (8). pp. 29-34.
4. Kanaev B.A., Tartakovsky B.D. On assessing the effectiveness of vibration-absorbing coatings in terms of radiation into the environment // Questions of shipbuilding. Series: acoustics. Central Research Institute "Rumb". 1984. pp. 63–66.
5. Kirpichnikov V. Yu., Savenko V.V., Smolnikov V. Yu. Small-sized means of vibration damping of thick-sheet plate structures // Works of the Krylov State Scientific Center. 2024. Issue. 4 (410).