

УДК: 628.517.4. 699.842  
OECD: 2.03 PU

## Об эффективности вибропоглощающих покрытий

Кирпичников В.Ю.<sup>1</sup>, Малинин И.О.<sup>2</sup>, Олейников А.Ю.<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Д.т.н., профессор, <sup>2</sup> Старший инженер, <sup>3</sup> К.т.н., доцент,

<sup>1,2</sup> ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г. Санкт-Петербург, РФ

<sup>1,3</sup> Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Дан краткий обзор основных видов вибропоглощающих покрытий. Изложены способы определения значений коэффициента потерь ( $\eta$ ) колебательной энергии в пластинах с мягкими, жесткими и армированными вибропоглощающими покрытиями, приведены соотношения для определения соответствующих характеристик для разных видов ВПП. Рассмотрены особенности вибродемпфирующей эффективности современных покрытий. Предложены пути устранения негативного влияния для мягкого вибропоглощающего покрытия, проявляющегося в некоторых случаях. Определены условия достижения наибольших значений  $\eta$  для жестких вибропоглощающих покрытий, а также технологические особенности нанесения жестких покрытий. Сделан вывод о различном влиянии массовых параметров армированного типа ВПП на его эффективность в различных диапазонах значений  $\mu$  и  $\mu_1$ . Приведены условия получения необходимой эффективности для армированного вибропоглощающего покрытия.

**Ключевые слова:** вибрация, шумоизлучение, коэффициент потерь, вибропоглощающее покрытие, эффективность вибропоглощения.

### *The effectiveness of vibration-absorbing coatings*

*Kirpichnikov V. Yu.<sup>1</sup>, Malinin I. O. <sup>2</sup>, Oleinikov A. Yu.<sup>3\*</sup>*

*<sup>1</sup> DSc, Professor, <sup>2</sup> Senior Engineer, <sup>3</sup> PhD, Associate Professor,*

*<sup>1,2</sup> Federal State Unitary Enterprise 'Krylov State Scientific Center', St. Petersburg, Russia*

*<sup>1,3</sup> Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia*

### **Abstract**

A brief overview of the main types of vibration-absorbing coatings is given. Methods for determining the values of the loss coefficient ( $\eta$ ) of vibrational energy in plates with soft, hard and reinforced vibration-absorbing coatings are outlined, and relationships are given for determining the corresponding characteristics for different types of airfoils. The features of the vibration-damping efficiency of modern coatings are considered. Ways have been proposed to eliminate the negative impact of a soft vibration-absorbing coating, which appears in some cases. The conditions for achieving the highest values of  $\eta$  for rigid vibration-absorbing coatings have been determined, as well as technological features of applying hard coatings. A conclusion is made about the different influence of the mass parameters of a reinforced runway type on its efficiency in different ranges of values of  $\mu$  and  $\mu_1$ . Conditions for obtaining maximum efficiency, for reinforced vibration-absorbing coating.

**Keywords:** vibration, noise emission, loss coefficient, vibration absorbing coating, vibration absorption efficiency.

## Введение

Одним из основных направлений снижения уровней вибрации и шумоизлучения инженерных конструкций различного рода является облицовка их пластинчатых элементов (далее – пластин) вибропоглощающим покрытием (ВПП).

Различают три основных типа ВПП: мягкие, жесткие и армированные. Отличительными особенностями ВПП являются конструктивное оформление и неодинаковый характер деформации вязкоупругих материалов, возникающей при их виброисмещениях под действием колебаний демпфируемой пластины. Конструкция и физические основы вибродемпфирования современных ВПП описаны во многих работах, например в [1, 2].

### 1. Краткий обзор основных видов вибропоглощающих покрытий

Мягкие ВПП состоят из одного или нескольких слоев вязкоупругого материала (преимущественно резины с малыми значениями динамических модулей упругости и сдвига), в котором на частотах работоспособности ВПП возникают волновые процессы, распространяющиеся в направлении толщины материала.

Жесткие покрытия содержат преимущественно один слой вязкоупругого материала в виде пластмассы, наносимой в жидкообразном состоянии на поверхность демпфируемой пластины. Деформация пластмассы связана с ее сжатием (растяжением) в направлении плоскости пластины.

Армированные вибропоглощающие покрытия (АВП) простейшей конструкции представляют собой диссипативный слой вязкоупругого материала, одна из поверхностей которого соединена с армирующим слоем из жесткого материала (металл, стеклопластик), а другая – с поверхностью демпфируемой пластины. При ее изгибе в вязкоупругом материале (мягкая резина, полимеры) из-за тормозящего действия его колебаниям армирующего слоя возникают деформации сдвига, за счет которых и происходит поглощение вибрационной энергии.

В общем случае можно считать, что установка любого типа ВПП на возбуждаемую усилием пластину приводит к изменению ее инерционной, жесткостной и диссипативной характеристик и как следствие – вибрационного отклика конструкции на действие усилия. При этом в зависимости от параметров пластины и покрытия, а также от частоты возбуждения этот отклик может быть и слабым и достаточно заметным, выраженным как уменьшением, так, в некоторых случаях, и ростом уровней вибрации. Соответствующие изменения этих уровней характеризуют положительную или отрицательную эффективность ВПП.

Важнейшим параметром, определяющим эффективность покрытия ( $\mathcal{E}$ , дБ), является коэффициент потерь  $\eta$  колебательной энергии в задемпфированной пластине. Действительно, при малом или нулевом изменении покрытием потерь колебательной энергии в пластине его эффективность  $\mathcal{E} = N \lg(\eta/\eta_0)$ , дБ, оказывается невысокой или равной нулю ( $\eta_0$  – коэффициент потерь в конструкции без покрытия).

Точность задания значений  $\eta_0$  и  $\eta$  оказывает непосредственное влияние на погрешность расчетов уровней вибрации и шумоизлучения пластинчатых элементов конструкций. Завышение потерь колебательной энергии при наличии ВПП может привести к занижению расчетных и, как следствие, к превышению достигнутых уровней вибрации и шума над их предельно допустимыми величинами.

С учетом сказанного «надежность» информации о значениях коэффициентов потерь  $\eta_0$  и  $\eta$  имеет принципиальное значение для выполнения требований, предъявляемых к виброшумовым параметрам, и разработки мероприятий по уменьшению вибрации и шума.

В качестве значений  $\eta_0$  обычно принимаются измеренные величины, приведенные, например, в работах [3, 4].

Далее кратко изложены способы расчетного определения значений  $\eta$  с особенностями вибродемпфирующей эффективности современных ВПП. Рассмотрен диапазон низких и средних звуковых частот, в котором, как правило, возникают наибольшие трудности снижения вибрации и шума.

## 2. Мягкие вибропоглощающие покрытия

Типовая расчетная частотная зависимость коэффициента потерь  $\eta$  пластины с мягким ВПП приведена на рис. 1.

Зависимость содержит два следующих частотных диапазона:

- низкочастотный диапазон с ростом значений  $\eta$  с повышением частоты;
- диапазон с резонансными и антирезонансными частотами упругих колебаний покрытия в направлении толщины.

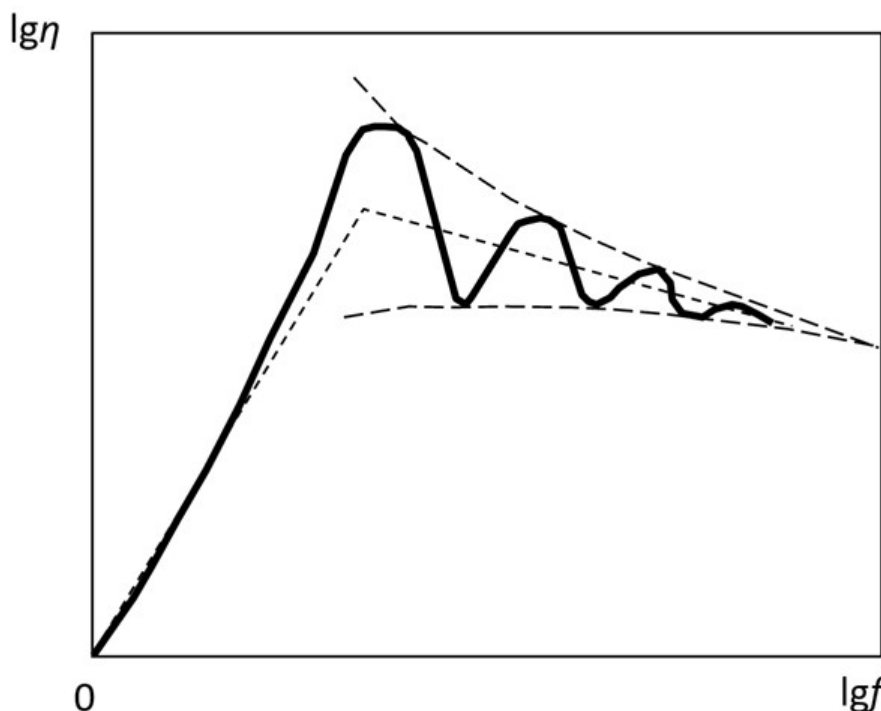


Рис. 1. Частотная зависимость коэффициента потерь пластины с мягким вибропоглощающим покрытием

Максимальное значение коэффициент потерь  $\eta$  пластины с покрытием имеет на низшей резонансной частоте  $f_p = c_2/4h_2$  колебаний покрытия ( $c_2$  – скорость распространения упругих колебаний в покрытии,  $h_2$  – его толщина), на которой в направлении толщины укладывается одна четвертая часть длины его упругой волны. Это значение  $\eta$  может быть вычислено с использованием формулы

$$\eta = \frac{\eta_2}{1 + 1,23\mu_{12}\eta_2^2}, \quad (1)$$

где  $\eta_2$  – коэффициент потерь материала покрытия,  $\mu_{12} = m_1/m_2$  ( $m_1 = \rho_1 h_1$  – масса единицы площади пластины толщиной  $h_1$  с плотностью материала  $\rho_1$ ;  $m_2 = \rho_2 h_2$  – масса единицы площади ВПП).

Из формулы (1) видно, что максимальное значение  $\eta$  не может быть больше коэффициента потерь в материале покрытия  $\eta_2$ . Равенство  $\eta$  значению  $\eta_2$  достигается только при малых величинах как  $\eta_2$ , так и  $\mu_{12}$ , соответствующего невыполнимому для большинства инженерных конструкций условию  $m_2 > m_1$ .

Выражение (1) получено без учета резонансных колебаний динамической системы «пластина–покрытие». Их влияние на эффективность мягкого покрытия исследовано в работе [5]. В частотных зависимостях эффективности типовых покрытий на сравнительно тонких (3-6 мм) стальных пластинах выявлен, в частности, диапазон отрицательной эффективности покрытий, в котором они увеличивают шумоизлучение вибрирующих пластин.

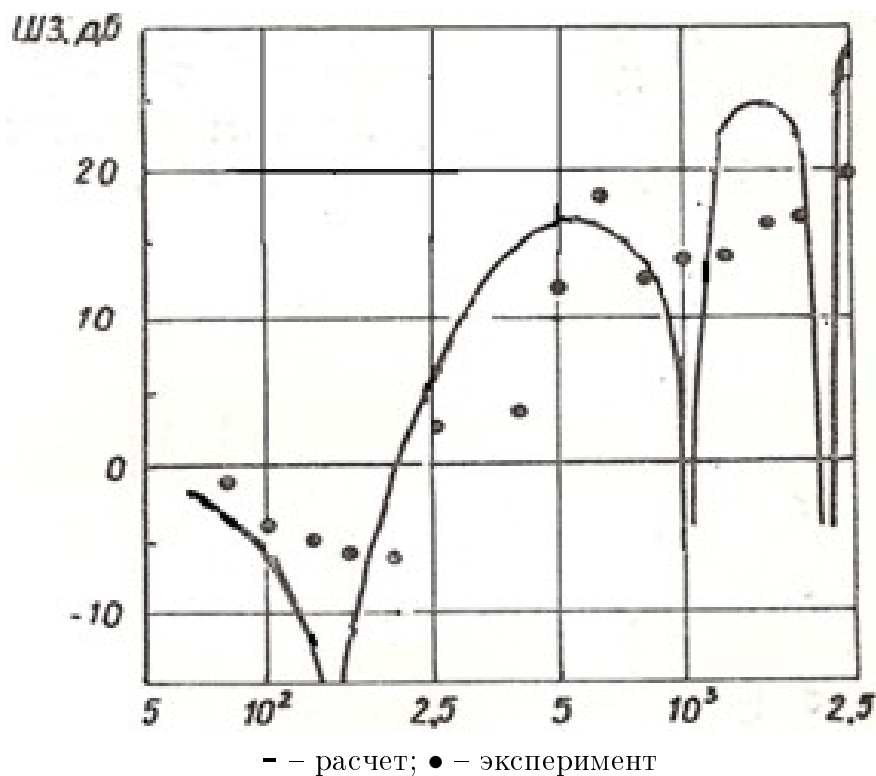


Рис. 2. Шумозаглушающая эффективность конструкции, состоящей из стального листа  $h = 5 \cdot 10^{-3}$  м и покрытия с параметрами  $M = 9,9$  кг/м<sup>2</sup>,  $\rho_2 c_2 = 1,86 \cdot 10^4$  кг/с·м<sup>2</sup>

В качестве примера на рис. 2 приведены расчетная и экспериментальная частотные характеристики шумозаглушающей эффективности покрытия с массой единицы площади  $m_2 = 9,9$  кг/м<sup>2</sup> и волновым сопротивлением  $\rho_2 c_2 = 1,86 \cdot 10^4$  кг/с·м<sup>2</sup>, установленного на находящуюся в воде стальную пластину толщиной 5 мм. На рисунке видны расчетные значения как верхней граничной частоты ( $f_k = 209$  Гц) указанного диапазона, так и частоты с наибольшим отрицательным значением эффективности ( $f_{min} = 145$  Гц).

Вычисления этих частот выполнены с использованием следующих приближенных формул [5]

$$f_k = 0,55 \frac{\rho_2 c_2}{m_2} \left\{ 1 + \frac{m_2}{4m_1} - \left[ 1 + \frac{m_2}{6m_1} \left( 1 + \frac{3m_2}{8m_1} \right) \right]^{1/2} \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

$$f_{min} = 0,28 \frac{\rho_2 c_2}{m_2} \left\{ 1 + \frac{m_2}{2m_1} - \left[ 1 + \frac{m_2}{3m_1} \left( 1 + \frac{3m_2}{4m_1} \right) \right]^{1/2} \right\}^{1/2}. \quad (3)$$

Влияние резонансных упругих колебаний мягкого покрытия ( $m_2 = 76,8 \text{ кг/м}^2$ ,  $\rho_2 c_2 = 1,51 \cdot 10^5 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ ) на его вибродемпфирующую эффективность при установке на толстолистовую ( $h_1 = 0,055 \text{ м}$ ) стальную пластину в воздухе исследовалось в работе [6]. Расчетные значения частот  $f_k$  и  $f_{min}$  оказались равными 184 и 31 Гц. Отрицательная эффективность покрытия была подтверждена измерениями вибрации пластины при ее возбуждении сосредоточенным усилием. Типичные узкополосные ( $\Delta f = 1 \text{ Гц}$ ) спектры входной вибровозбудимости  $A/F$ , дБ, пластины при отсутствии и наличии покрытия приведены на рис. 3.

Обращаясь к рисунку, видим, что установка покрытия на пластину привела к существенному (более 14 дБ) уменьшению уровней ее вибрации на резонансных частотах 369 Гц и выше. На более низких резонансных частотах уровни  $A/F$ , дБ, остались без изменения. Во всем частотном диапазоне измерений был зарегистрирован рост уровней вибрации на нерезонансных частотах. Следствием этого являлось наличие большого числа третьоктавных полос с нулевым или отрицательным влиянием покрытия на вибровозбудимость пластины.

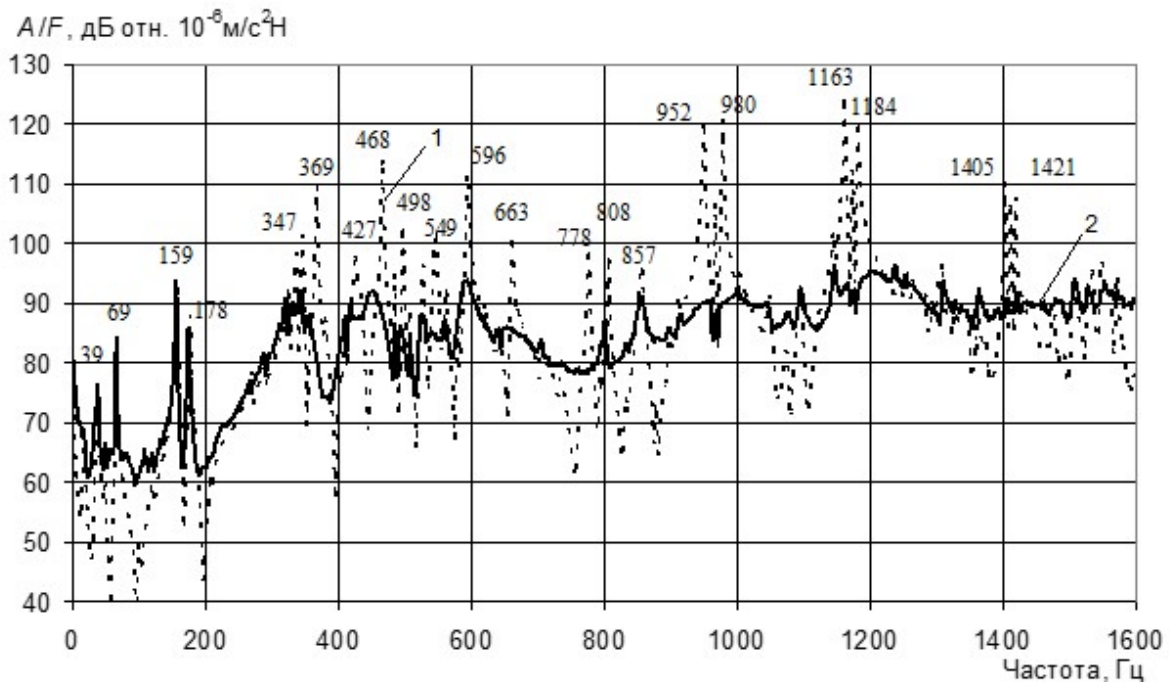


Рис. 3. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины без покрытия (1) и с покрытием (2)

Типичный спектр разницы  $\Delta$ , дБ, третьоктавных уровней входной вибровозбудимости толстолистовой пластины без покрытия и с покрытием приведен на рис. 4. Точками на рисунке обозначены экспериментальные значения шумозаглушающей эффективности покрытия на пластине толщиной 6 мм [5]. Видим, что при установке покрытия как на тонкую, так и на более толстую пластины в частотных зависимостях  $\Delta$ , дБ, имеется низкочастотный диапазон, в котором наличие покрытия приводит к увеличению вибрации и шумоизлучения демпфируемой пластины.

В работе [6] сделан вывод, что наиболее вероятной причиной отрицательной эффективности мягкого покрытия является возникновение в его листах резонансных колебаний и их обратное влияние на вибрационные процессы в демпфируемой пластине. Об этом косвенно свидетельствует, в частности, нахождение в соответствующем диапазоне всех расчетных значений резонансных частот квазиизгибных (23 Гц), продольных (157 и 196 Гц) и сдвиговых (91 и 114 Гц) колебаний листа покрытия. Увеличение покрытием колебаний пластины связано с отражениями упругих волн от кромок листа при малых потерях в нем колебательной энергии с последующим воздействием резонансной вибрации листа на пластину. На аналогичное большее влияние отражений упругих волн от границ амортизаторов в сравнении с их поглощением в амортизаторах на их низшей резонансной частоте с отрицательной эффективностью указывалось в работе [7].

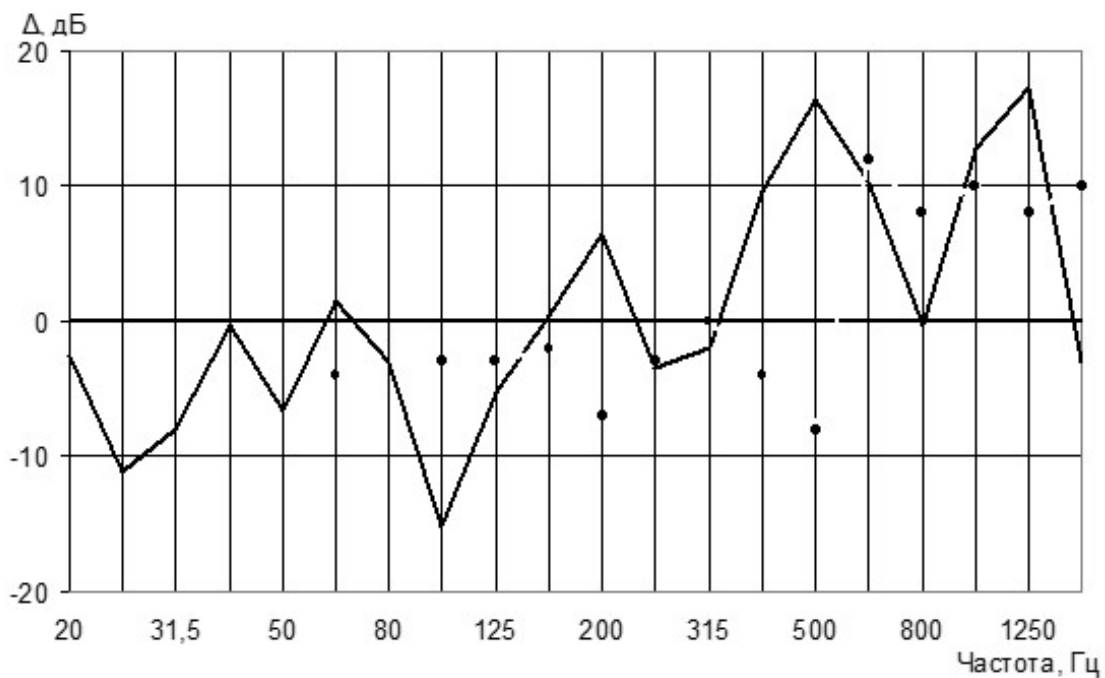


Рис. 4. Разница третьоктавных уровней вибровозбудимости пластины без покрытия и с покрытием. Точками обозначены значения шумозаглушающей эффективности покрытия на пластине толщиной 6 мм

Негативное влияние мягкого ВПП на вибрации демпфируемой пластины может быть устранено увеличением потерь колебательной энергии как непосредственно в покрытии, так и в демпфируемой пластине.

### 3. Жесткие вибропоглощающие покрытия

Эффективность жестких ВПП обусловлена как поглощением колебательной энергии в вязкоупругом материале, так и увеличением при установке покрытий массы и жесткости демпфируемой конструкции.

Коэффициент потерь  $\eta$  изгибно-колеблющейся пластины, на которую нанесено жесткое вибропоглощающее покрытие, может быть определен с использованием формулы [1]

$$\eta \approx \frac{\eta_2}{1 + [\alpha_2 \beta_2 (\alpha_2^2 + 12\alpha_{21}^2)]^{-1}}, \quad (4)$$

где  $\eta_2$  – коэффициент потерь материала покрытия;  $\alpha_2 = h_2/h_1$  ( $h_1$  и  $h_2$  – толщины пластины и покрытия);  $\beta_2 = E_2/E_1$  ( $E_1$  и  $E_2$  – модули Юнга пластины и материала покрытия);  $\alpha_{21} = (1 + \alpha_2)/2 = h_{21}/h_1$  ( $h_{21}$  – расстояние между нейтральными плоскостями демпфируемой пластины и вязкоупругого материала).

Формула (4) справедлива при выполняемом в большинстве случаев на практике условии  $\beta_2 < 10^{-2}$ .

Для приближенных оценок значений  $\eta$  часто используется упрощенный вариант формулы (4)

$$\eta = \frac{E_2 J_2}{E_1 J_1} \eta_2, \quad (5)$$

где  $J_1$  и  $J_2$  – моменты инерции пластины и покрытия относительно собственной нейтральной оси ( $J_1 = \frac{h_1^3}{12(1-\sigma_1^2)}$ ,  $J_2 = \frac{h_2^3}{12(1-\sigma_2^2)}$ ,  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – коэффициенты Пуассона пластины и материала покрытия).

Приведенное выражение отражает значимое влияние изгибной жесткости вибропоглощающего материала на эффективность покрытия. (Именно поэтому покрытия рассматриваемого типа называют жесткими).

Из формул (4) и (5) следует, что при увеличении толщины покрытия до размеров, когда наличие демпфируемой пластины становится несущественным, коэффициент потерь  $\eta$  колебаний пластины стремится к значению потерь  $\eta_2$  в покрытии.

На рис. 5 приведена зависимость коэффициента  $\eta$  стальной пластины от соотношения толщин  $h_2/h_1$  покрытия и пластины. Из рисунка видно, что достаточной толщиной жесткого покрытия, обеспечивающей близкий к максимальному эффект вибропоглощения, является толщина  $h_2$ , превышающая  $h_1$  в три–четыре раза.

Расчетное по формуле (5) значение  $\eta$  при нанесении на стальную пластину толщиной  $h_1 = 5 \cdot 10^{-3}$  м жесткого ВПП толщиной  $h_2 = 2h_1$ , изготовленного из отечественной эпоксидной мастики «Антивибрит-7» ( $E_2 = 3 \cdot 10^3$  МПа) со значением коэффициента потерь  $\eta_2 = 0,75$  при комнатной температуре, равняется примерно 0,09. Относительная масса покрытия составляет  $\sim 39\%$ . Большинство материалов жестких ВПП имеют существенно меньшие диссипативные потери и при такой же массе худшую чем «Антивибрит-7» эффективность.

Значения  $\eta_2$  и  $E_2$ , нашедших в последние годы наибольшее применение в судостроении мастик для изготовления жестких вибропоглощающих покрытий «Випоком», «Мавип» и «Адем», находятся в пределах от 0,15 до 0,31 и от  $3 \cdot 10^9$  до  $\sim 10^{10}$  Па соответственно. При средних значениях коэффициента потерь ( $\eta_2 = 0,23$ ) и динамического модуля упругости ( $E_2 = 6,5 \cdot 10^9$  Па) мастики и толщине ее нанесения, равной двум толщинам демпфируемой пластины из стали ( $E_1 = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па), расчетное значение  $\eta$  пластины с жестким ВПП равняется  $\sim 0,06$ .

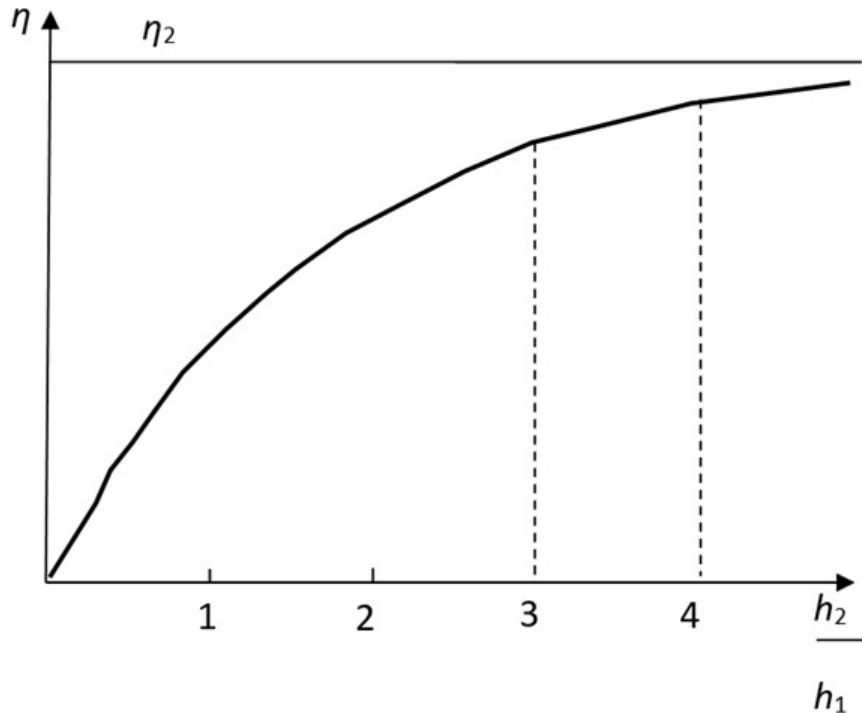


Рис. 5. Зависимость коэффициента потерь стальной пластины, облицованной жестким вибропоглощающим покрытием, от толщины покрытия

К технологическим недостаткам изготовления жестких ВПП можно отнести необходимость специальной подготовки поверхности демпфируемой конструкции к нанесению мастик, особенности их изготовления, нанесения и герметизации, а также необходимость выполнения условий по температуре и влажности для надежного отверждения мастик в течение достаточно длительного времени.

#### 4. Армированные вибропоглощающие покрытия (АВП)

Основным направлением работ по совершенствованию ВПП и иных средств снижения вибрации и шума является уменьшение их массы с одновременным повышением эффективности в диапазоне низких и средних звуковых частот [8-15]. Наиболее перспективными для минимизации массы и повышения эффективности оказались средства с тонким слоем полимерной пленки из поливинилацетата, являющегося «рекордсменом» по величине потерь колебательной энергии в существующих вибропоглощающих материалах. Значения коэффициента потерь  $\eta_2$  пленки из указанного материала в диапазоне рабочих температур порядка двадцати–тридцати градусов находятся в пределах от 1 до 3 [8].

Результаты экспериментального исследования эффективности различных вариантов АВП, отличающихся толщинами пленки и армирующего слоя из алюминия и стали обобщены в работе [9]. Сведения о вариантах испытанных АВП и их эффективности содержатся в нижеследующей таблице.

Приведена следующая информация о вариантах покрытия:

- толщина  $h$ , мм, армирующего и диссипативного слоев АВП;
- материал армирующего слоя покрытий (Ал – алюминий, Ст – сталь);
- марка полимерной пленки (1 – ВПС-2,5, 2 – ВПНС-1, 3 – ВПНС-4) в составе покрытий;



– отношения массы покрытия к массе пластины  $\mu$  и массы армирующего слоя покрытия к массе полимерной пленки  $\mu_1$ ;

– эффективность  $\mathcal{E}$ , дБ, покрытий; в качестве  $\mathcal{E}$  приведены усредненные по точкам в пучностях форм четырех низших резонансных частот изгибных колебаний стальной пластины с размерами  $0,52 \times 0,38 \times 3 \cdot 10^{-3}$  м и по пятнадцати наибольшим максимумам в спектрах ее входной вибровозбудимости в диапазоне частот 0-1600 Гц.

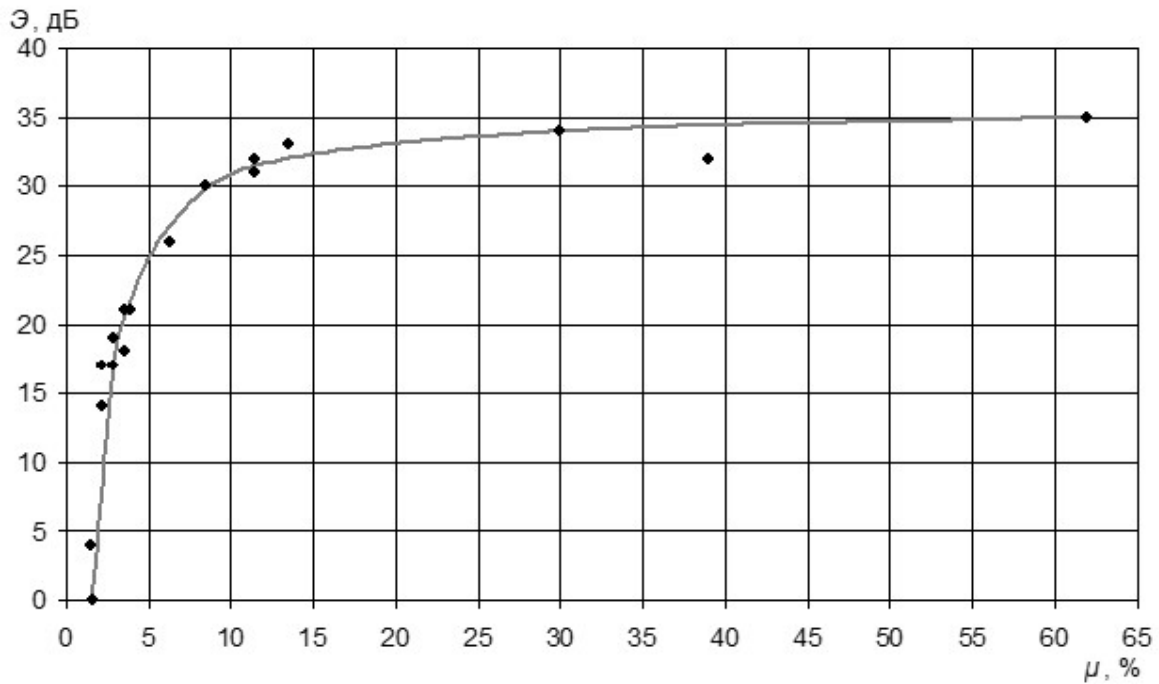
В таблицу 1 включены лишь результаты испытаний с одинаковой технологией изготовления и установки АВП на демпфируемую пластину.

Содержащиеся в таблице одинаковые по массовым параметрам покрытия (АВП2 и АВП17, АВП3 и АВП18, АВП4 и АВП19) изготавливались и испытывались в разное время с промежуточным интервалом до нескольких лет. Мало отличающиеся результаты их испытаний подтверждают стабильность диссипативных характеристик полимерных пленок и приведенных значений эффективности покрытий.

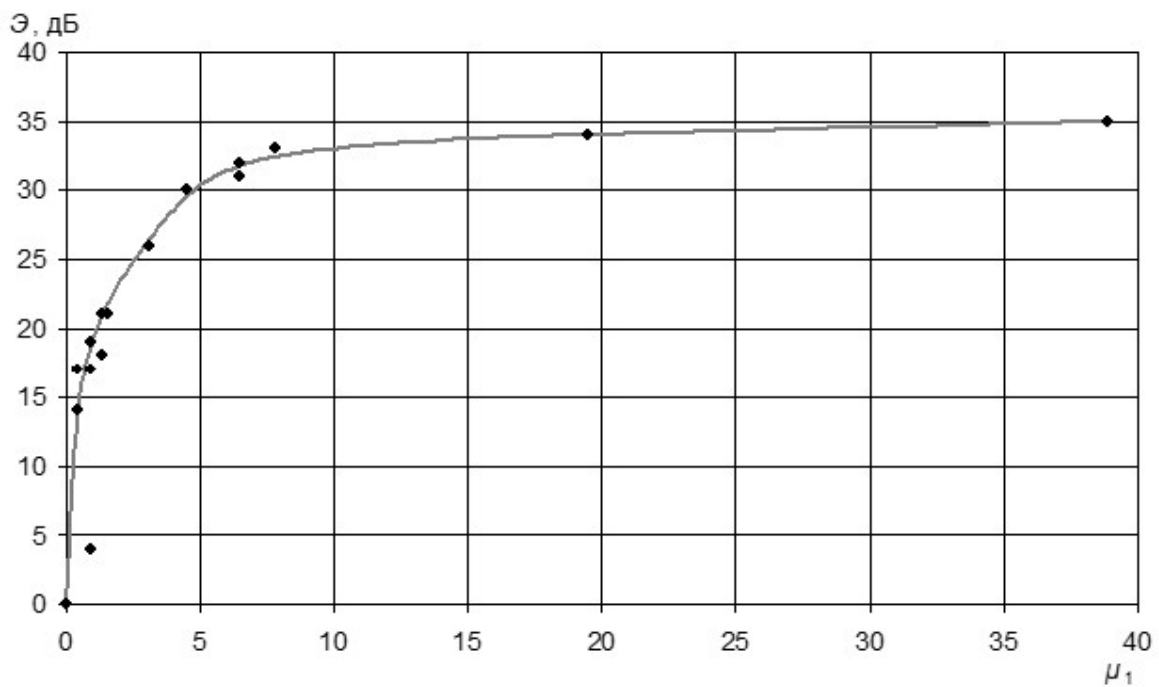
Таблица 1

Сведения о вариантах АВП и его эффективности

№ АВП	Армирующий слой		Диссипативный слой		$\mu$ , %	$\mu_1$	$\mathcal{E}$ , дБ
	$h$ , мм	материал	$h$ , мм	марка			
1	0,01	Ал	0,5	1	1,6	0,045	0
2	0,1	Ал	0,5	1	2,2	0,45	17
3	0,2	Ал	0,5	1	2,9	0,90	19
4	0,3	Ал	0,5	1	3,6	1,35	21
5	0,12	Ст	0,5	1	3,9	1,55	21
6	0,24	Ст	0,5	1	6,3	3,12	26
7	0,6	Ст	0,5	1	13,5	7,79	33
8	1,5	Ст	0,5	1	30	19,5	34
9	3,0	Ст	0,5	1	62	38,9	35
10	0,5	Ст	0,5	1	11,5	6,5	32
11	0,5	Ст	0,5	2	11,5	6,5	31
12	0,5	Ст	0,5	3	11,5	6,5	31
13	0,5	Ст	0,5	1, 2, 3	11,5	6,5	31
14	0,5	Ст	0,5	1, 2, 3	11,5	6,5	31
15	0,5	Ст	0,5	1, 2, 3	11,5	6,5	31
16	1,0	Ал	0,5	1	8,5	4,5	30
17	0,1	Ал	0,5	1	2,2	0,45	14
18	0,2	Ал	0,5	1	2,9	0,90	17
19	0,3	Ал	0,5	1	3,6	1,35	18
20	0,1	Ал	0,25	1	1,5	0,91	4
21	0,5	Ст	0,5	1	39	6,5	32



а)



б)

Рис. 6. Зависимость эффективности АВП от его относительной массы  $\mu$  (а) и отношения  $\mu_1$  (б) массы армирующего слоя к массе полимерной пленки

Был сделан вывод о различном влиянии массовых параметров рассматриваемого типа ВПП на его эффективность в следующих диапазонах значений  $\mu$  и  $\mu_1$  (рис. 6):  
– с нулевой или малой величиной эффективности при значениях  $\mu \leq 1,6\%$ ; при

практически одинаковом значении  $\mu \approx 1,6\%$  (АВП1) и  $\mu \approx 1,5\%$  (АВП20) бóльшую эффективность имеет вариант АВП20 с меньшей толщиной диссипативного слоя и бóльшим значением  $\mu_1$ ;

– с интенсивным ростом эффективности при увеличении  $\mu$  от значения 1,6% до значения 2,2%;

– с малым ростом эффективности при увеличении  $\mu$  от значения 2,2% до значения 3,9%;

– с повышением эффективности на 5–6 дБ при каждом почти двукратном увеличении массы армирующего слоя ( $1,55 \leq \mu_1 \leq 6,5$ ) в сравнении с массой пленки в диапазоне значений  $3,9\% \leq \mu \leq 11,5\%$ , достигая эффективности около 30 дБ;

– со значениями  $\mu > 11,5\%$  и  $\mu_1 > 6,5$ , при которых повышение эффективности АВП с ростом значений его относительных параметров практически не наблюдается и составляет не более 35 дБ.

С использованием приведенных в таблице усредненных по резонансным частотам и точкам измерения величин эффективности  $\mathcal{E}$ , дБ, АВП были определены средние по выполненным испытаниям значения коэффициента потерь демпфируемых пластин. Вычисления соответствующих экспериментальных значений  $\eta$  выполнялись по формуле  $\eta = \eta_0 \cdot 10^{0,05\mathcal{E}}$ . Коэффициент потерь  $\eta_0$  при отсутствии АВП на пластинах принимался равным  $3 \cdot 10^{-3}$ .

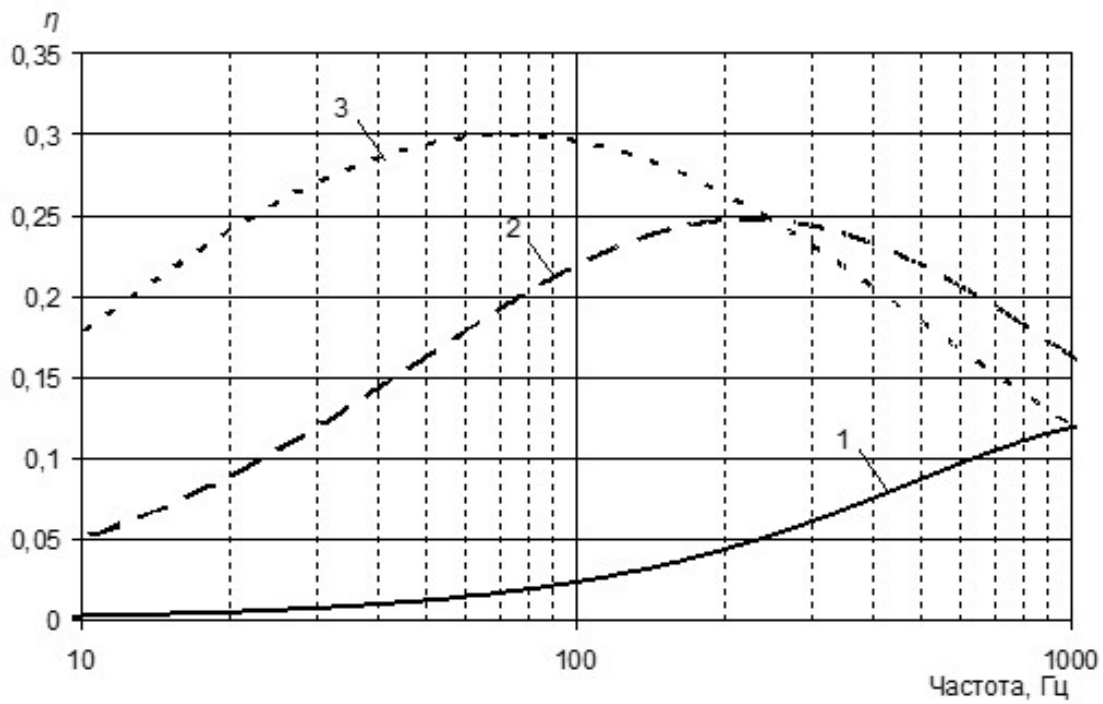
Для определения расчетных значений  $\eta$  использовалась формула

$$\eta = \frac{\eta_2 \gamma g_2}{1 + g_2^2 + g_2^2 \eta_2^2 + \gamma [1 + g_2 (1 + \eta_2^2)]}, \quad (6)$$

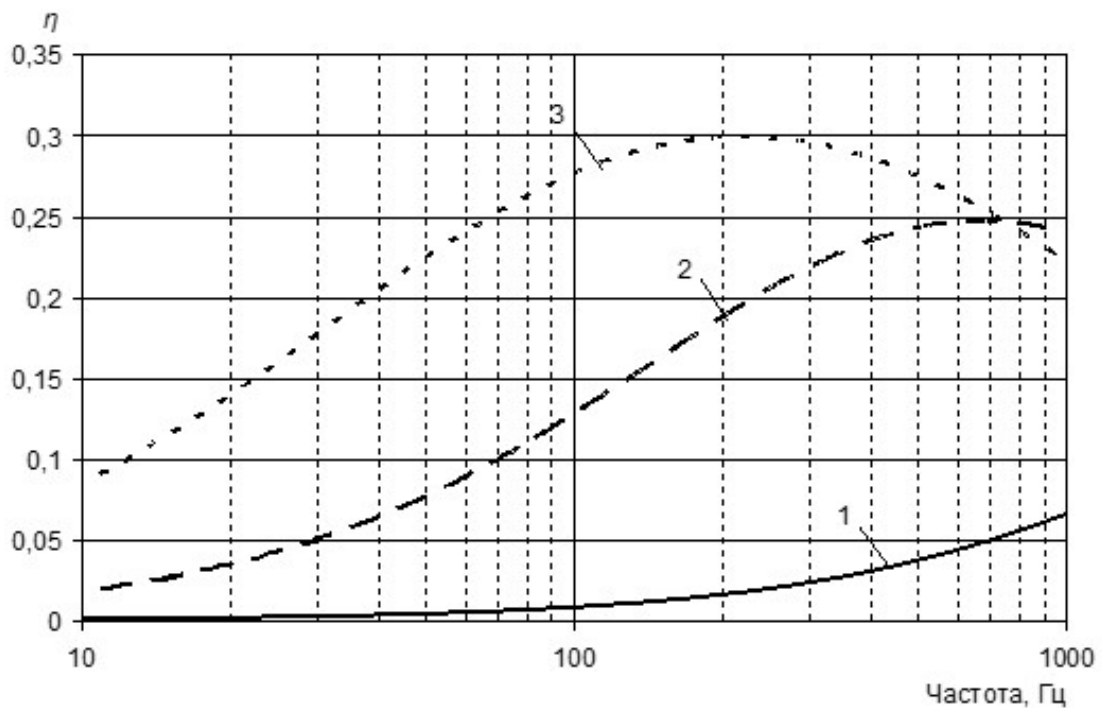
где  $\gamma = 12\alpha_3 \left[ \frac{1}{4} (1 + 2\alpha_3) + \alpha_2 (1 + \alpha_3) \right]$  ( $\alpha_2 = h_2/h_1$ ,  $\alpha_3 = h_3/h_1$ ,  $h_1$  – толщина демпфируемой пластины,  $h_2$  – толщина полимерной пленки,  $h_3$  – толщина армирующего слоя покрытия);  $g_2 = \frac{G_2}{E_3 h_3 K_n^2 h_2}$ , ( $G_2$  – модуль сдвиговых колебаний полимерной пленки,  $3,3 \cdot 10^7$  Па;  $E_3$  – модуль Юнга армирующего слоя из стали,  $2,1 \cdot 10^{11}$  Па, и алюминия,  $0,71 \cdot 10^{11}$  Па;  $K_n$  – волновое число изгибных колебаний демпфируемой пластины,  $K_n = 0,063 \sqrt{\frac{f}{h_1}}$ ,  $f$  – частота).

Величина коэффициента потерь  $\eta_2$  колебательной энергии в поливинилацетате – материале пленки ВПС-2,5 – принималась равной ее среднему значению (2,0) в температурном диапазоне работоспособности. Значения толщин  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_3$  содержатся в таблице и тексте.

Результаты вычисления частотных зависимостей значений коэффициента потерь  $\eta$  с использованием формулы (6) для трех величин (0,1; 0,4 и 0,8) относительной толщины армирующего слоя из стали (а) и алюминия (б) приведены на рис. 7. Из рисунка видно, что повышение значений  $\eta$  во всем расчетном (до 1000 Гц) диапазоне частот может быть достигнуто увеличением относительной толщины армирующего слоя АВП от значения 0,1 только до значения 0,4. Бóльшее увеличение  $h_3/h_1$  к повышению  $\eta$  на частотах  $f \geq 300$  Гц не приводит.



а)



б)

Рис. 7. Расчетные значения коэффициента потерь пластины, облицованной АВП с армирующим слоем из стали (а) и алюминия (б) при его относительной толщине  $h_3 = 0,1h_1$  (1),  $0,4h_1$  (2) и  $0,8h_1$  (3)

На рис. 8 приведены средние по частоте расчетные и экспериментальные значения  $\eta$  при облицовке пластины покрытием с армирующим слоем из стали (кривая 1) и алюминия (кривая 2). Обращаясь к рисунку, видим хорошее в обоих случаях согласование расчетных и экспериментальных значений при  $h_3/h_1 \leq 0,3$ . При больших значениях относительной толщины армирующего слоя из стали расчет дает завышенные значения.

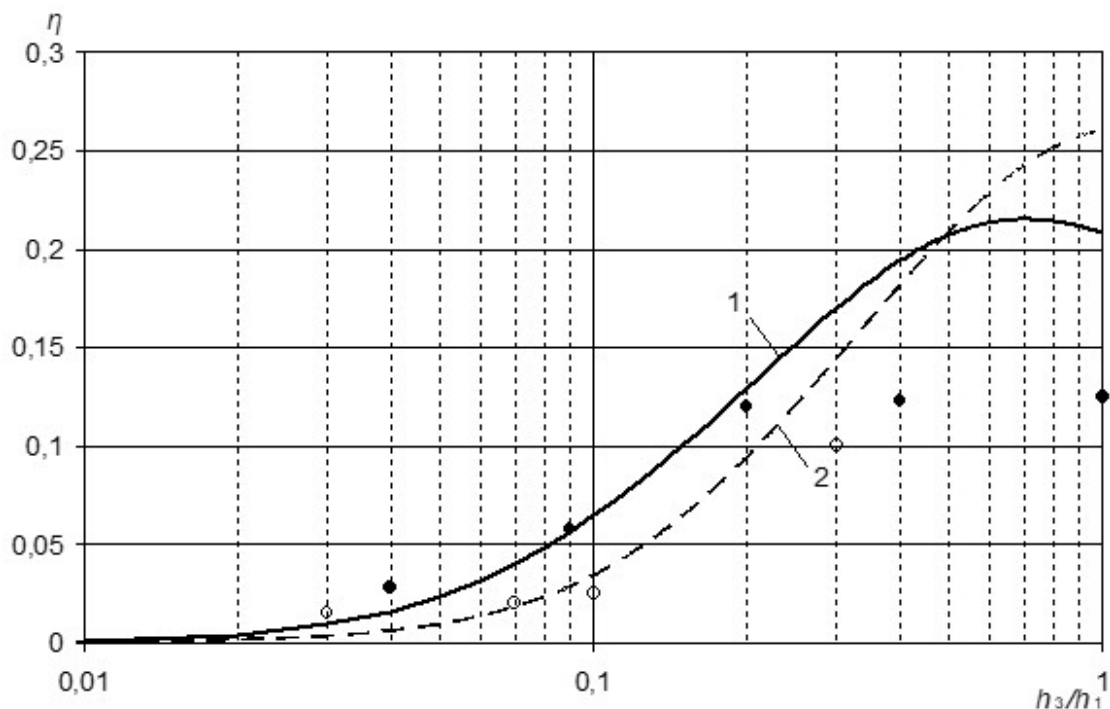


Рис. 8. Расчетные и экспериментальные значения  $\eta$  при облицовке пластины покрытием с армирующим слоем из стали (— и ●) и алюминия (--- и ○)

### Заключение

Приведенные в статье результаты могут быть использованы при выполнении расчетной оценки эффективности уменьшения уровней вибрации пластинчатых и оболочечных конструкций мягкими, жесткими и армированными вибропоглощающими покрытиями. Полученные результаты позволяют уточнить пути уменьшения негативного влияния мягкого вибропоглощающего покрытия и определить условия достижения наибольших значений  $\eta$  для жестких вибропоглощающих покрытий. Приведены сведения об испытанных вариантах армированного вибропоглощающего покрытия. Сделан вывод о различном влиянии массовых параметров армированного типа ВПП на его эффективность в различных диапазонах значений  $\mu$  и  $\mu_1$  и приведены соотношения для расчета коэффициента потерь колебательной энергии для армированного вибропоглощающего покрытия.

### Список литературы

1. Никифоров А.С. Вибропоглощение на судах. Л.: Судостроение, 1979.

2. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций. Справочник. Л.: Судостроение, 1990.
3. Грушецкий И.В., Гришин А.А. Измерение и использование в расчетах коэффициентов внутренних потерь корабельных конструкций // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2008. Вып. 40 (324).
4. Кирпичников В.Ю. Вибровозбудимость конструкций и пути ее уменьшения. // ФГУП «Крыловский государственный научный центр», СПб, 2014.
5. Кузьмичев М.Н. Зависимость шумозаглушающей эффективности конструкций с покрытиями от их звукоизолирующих и отражающих свойств // Техническая акустика. 1994. Т. III. Вып. 1–2. С. 14–17.
6. Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Смольников В.Ю., Виноградов А.В. Исследование вибраций толстостенной конструкции с акустическим покрытием // Труды Крыловского ГИЦ. 2024. Вып. 2 (408).
7. Клюкин И.И. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах. Л.: Судостроение, 1971.
8. Алексеев С.А., Сятковский А.И. Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. Вып. 6. С. 45–46.
9. Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Сятковский А.И. Влияние массовых параметров армированного вибропоглощающего покрытия на его эффективность // Труды Крыловского ГИЦ. 2024. Вып. 1 (407).
10. Кирпичников В.Ю., Кошчев А.П., Кудаев А.В. Экспериментальные исследования эффективности полосового вибропоглотителя с одноточечным креплением // Noise Theory and Practice, Том 9 №1 (I, 2023)
11. Кирпичников В.Ю., Смольников В.Ю., Кудаев А.В., Гусева Е.В., Сятковский А.И. Экспериментальные исследования вибродемпфирующих свойств композитных материалов на основе бумажно-слоистых пластиков hpl, содержащих встроенные слои из термопластичных пленок вpc-2,5, Стр. 40-48 //Noise Theory and Practice, Том 8 №4 (IV, 2022)
12. Soyibjon Negmatov, T Ulmasov, Farhod Navruzov, S Jovliyev Vibration damping composition polymer materials and coatings for engineering purpose // E3S Web of Conferences 264, 05034 (2021) // <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126405034> CONMECHYDRO - 2021
13. V. A. Sagomonova, A. E. Sorokin, A. P. Petrova, V. V. Tselikin, T. Yu. Tyumeneva Methods for the Manufacture of Layered Reinforced Vibration-Absorbing Materials Based on Thermoplastic Polyurethane and Metal // Polymer Science, Series D | Issue 3/2023
14. Jin, G., Chen, G., Zhao, Z. et al. Preparation of a superior damping coating and study on vibration damping properties. SN Appl. Sci. 5, 220 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05451-3>
15. Kirpichnikov V.Y., Koshcheev A.P., Syatkovskii A.I. Experimental study of effectiveness of reinforced vibration absorbing coatings. J Appl Mech Tech Phy 63, 54–58 (2022). <https://doi.org/10.1134/S0021894422010096>

## References

1. Nikiforov A.S. Vibration absorption on ships. L.: Shipbuilding, 1979.
2. Nikiforov A.S. Acoustic design of ship structures. Reference book. L.: Shipbuilding, 1990.
3. Grushetsky I.V., Grishin A.A. Measurement and use in calculations of coefficients of internal losses of ship structures // Proceedings of the Central Research Institute named after academician A.N. Krylov. 2008. Issue 40 (324).

4. Kirpichnikov V.Yu. Vibration excitability of structures and ways to reduce it. // FSUE "Krylov State Scientific Center", St. Petersburg, 2014.
5. Kuzmichev M.N. Dependence of the noise-damping efficiency of structures with coatings on their soundproof and reflective properties // Technical acoustics. 1994. Vol. III. Issues 1-2. pp. 14-17.
6. Kirpichnikov V.Yu., Savenko V.V., Smolnikov V.Yu., Vinogradov A.V. Investigation of vibrations of a thick-sheet structure with an acoustic coating // Proceedings of Krylovsky Scientific Research Center. 2024. Issue 2 (408).
7. Klyukin I.I. Combating noise and sound vibration on ships. L.: Shipbuilding, 1971.
8. Alekseev S.A., Syatkovsky A.I. Vibration damping properties of polymer films // Shipbuilding. 2015. Issue. 6. Pp. 45-46.
9. Kirpichnikov V.Yu., Savenko V.V., Syatkovsky A.I. The influence of mass parameters of reinforced vibration-absorbing coating on its effectiveness // Proceedings of Krylovsky Scientific Research Center. 2024. Issue 1 (407).
10. Kirpichnikov V.Yu., Kosheev A.P., Kudaev A.V. Experimental studies of the effectiveness of a single-point vibration absorber // Noise Theory and Practice, Volume 9 No. 1 (I, 2023)
11. Kirpichnikov V.Yu., Smolnikov V.Yu., Kudaev A.V., Guseva E.V., Syatkovsky A.I. Experimental studies vibration damping properties of composite materials based on hpl paper-laminated plastics containing embedded layers of thermoplastic films VPS-2,5, pp. 40-48 //Noise Theory and Practice, Volume 8 No. 4 (IV, 2022)
12. Soyibjon Negmatov, T Ulmasov, Farxod Navruzov, S Jovliyev Vibration damping composition polymer materials and coatings for engineering purpose // E3S Web of Conferences 264, 05034 (2021) // <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126405034> CONMECHYDRO - 2021
13. V. A. Sagomonova, A. E. Sorokin, A. P. Petrova, V. V. Tselikin, T. Yu. Tyumeneva Methods for the Manufacture of Layered Reinforced Vibration-Absorbing Materials Based on Thermoplastic Polyurethane and Metal // Polymer Science, Series D | Issue 3/2023
14. Jin, G., Chen, G., Zhao, Z. et al. Preparation of a superior damping coating and study on vibration damping properties. SN Appl. Sci. 5, 220 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05451-3>
15. Kirpichnikov V.Y., Koshcheev A.P., Syatkovskii A.I. Experimental study of effectiveness of reinforced vibration absorbing coatings. J Appl Mech Tech Phy 63, 54-58 (2022). <https://doi.org/10.1134/S0021894422010096>