

УДК: 534.16  
OECD: 01.03.AA

## Экспериментальные исследования вибродемпфирующих свойств композитных материалов на основе бумажно-слоистых пластиков hpl, содержащих встроенные слои из термопластичных пленок ВПС-2,5

Кирпичников В.Ю.<sup>1</sup>, Смольников В.Ю.<sup>2</sup>, Кудаев А.В.<sup>3\*</sup>, Гусева Е.В.<sup>4</sup>, Сятковский А.И.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Д.т.н., профессор, профессор кафедры «Экология и производственная безопасность»

<sup>2</sup> ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

<sup>3</sup> К.т.н., доцент, доцент кафедры «Экология и производственная безопасность»

<sup>4</sup> ООО «СЛОПЛАСТ»

<sup>5</sup> К.х.н., директор по науке ОАО «Пластполимер»

<sup>1,3</sup> Балтийский Государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова

<sup>1,2,3,4,5</sup> г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Выполнены измерения акустических параметров пластин из бумажно-слоистого пластика высокого давления НРЛ, модифицированного путем введения в его структуру слоев вибродемпфирующей термопластичной пленки ВПС-2,5. Исследовалось влияние количества интегрированных слоев и их расположения в матрице композита на входную вибровозбудимость, звукоизлучение и потери колебательной энергии в модифицированных пластинах. Получены величины эффективности уменьшения уровней вибрации и звукоизлучения в сравнении с не модифицированной пластиной НРЛ. Определены наименьшие уровни входной вибровозбудимости для трехслойной пластины с одним слоем пленки ВПС-2,5. Проведен анализ вибрационных и акустических характеристик контрольной и модифицированной пластиковых пластин типа НРЛ. Определены значения коэффициента потерь колебательной энергии на различных резонансных частотах.

**Ключевые слова:** вибродемпфирование, полимеры, вибровозбудимость, многослойные композитные материалы, пленки ВПС-2,5.

### *Experimental studies of vibration-damping properties of composite materials based on hpl paper-laminated plastics containing imbedded layers of VPS-2.5 thermoplastic films*

Kirpichnikov V. Yu.<sup>1</sup>, Smolnikov V. Yu.<sup>2</sup>, Kudaev A. V.<sup>3\*</sup>, Guseva E. V.<sup>4</sup>, Syatkovsky A. I.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> DSc, full professor, professor of the Department 'Ecology and Industrial Safety'

<sup>2</sup> Federal state unitary enterprise 'State Scientific Center Krylovsky'

<sup>3</sup> PhD in Eng., Associate Professor, Associate Professor of the Department 'Ecology and Industrial Safety'

<sup>4</sup> LLC 'SLOPLAST'

<sup>5</sup> Ph.D. in Chem, Director of Science, JSC 'Plastpolymer'

<sup>1,3</sup> Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov

<sup>1,2,3,4,5</sup> St. Petersburg, Russia

### **Abstract**

The acoustic parameters of plates made of HPL high-pressure laminate modified by introducing layers of a vibration-damping thermoplastic film VPS-2.5 into its structure were measured. The influence of the number of integrated layers and their location in the composite matrix on the input vibration excitability, sound emission, and vibrational energy losses in modified plates. Efficiency values for reducing vibration levels and sound emission are obtained in comparison with an unmodified HPL plate. The lowest levels of input vibroexcitability for a three-layer plate with one layer of VPS-2.5 film are determined. The analysis of vibrational and acoustic characteristics of the control and modified plastic plates of the HPL type was carried out. The values of the loss coefficient of vibrational energy at different resonant frequencies are determined.

**Keywords:** vibration damping, polymers, vibration excitability, multilayer composite materials, VPS-2.5 films.

### **Введение**

Улучшение виброшумовых характеристик корпусных и внутрикорпусных конструкций транспортных средств является одним из основных направлений создания благоприятных условий для жизнедеятельности обслуживающего персонала и пассажиров [1].

Наиболее перспективным направлением создания вибродемпфирующих материалов является разработка новых многослойных конструкционных композитных материалов с интегрированными внутренними вибропоглощающими слоями [2–4]. Конструкционный композитный материал «Слопласт ТГ», используемый для внутренней отделки жилых, производственных зданий и сооружений, а также для внутренних интерьеров транспортных средств (ж/д вагонов, судов, автобусов) представляет собой многослойный композит, состоящий из листов крафт-бумаги, пропитанных терморезактивными смолами. В процессе его горячего прессования образуется однородный монолитный материал (бумажно-слоистый пластик НРЛ), толщина которого составляет от 0,6 до 25 мм, в зависимости от исходного количества слоев [5].

Целью настоящей работы являлось изготовление и исследование динамических свойств модифицированных композитных материалов, полученных путем интегрирования во внутреннюю структуру «Слопласт ТГ» тонких, термопластичных, самоклеящихся пленок на основе поливинилацетата ВПС-2,5.

Выбор пленок ВПС-2,5 в качестве демпфирующего слоя обусловлен следующими причинами:

- чрезвычайно высокими диссипативными свойствами, которые реализуются в очень тонких пленках [6, 7], что необходимо для обеспечения достаточной общей жесткости слоистого композитного материала при интегрировании в него мягких полимерных слоев [8];

- высокими клеящими свойствами полимеров на основе поливинилацетата к бумажным носителям [9], что необходимо для обеспечения монолитности модифицированного композита.

Плотность пластика НРЛ (далее – пластик) меньше плотности стали примерно в 5 раз. Потери колебательной энергии в существенно более легких конструкциях из пластика, удовлетворяющих предъявляемым к ним требованиям прочности, определяются значениями коэффициента потерь  $\eta$  в диапазоне низких и средних звуковых частот порядка 0,02–0,03 Гц.

Такие величины не превышают конструкционных потерь, присущих традиционным

изготовленным из металлов, корпусным и внутрикорпусным конструкциям транспортных средств. С учетом этого, эффект уменьшения уровней вибрации и шума при использовании облегченных пластиковых конструкций вместо металлических, оказывается достаточно малым. С учетом изложенного, задача улучшения диссипативных свойств пластика типа НРЛ является достаточно актуальной.

## 1. Экспериментальная часть

Испытывалось пять малогабаритных пластин, имеющих одинаковую толщину и квадратную форму в плане со стороной 0,175 м. Модифицированные пластины пластика изготавливались заменой перед процедурой горячего прессования части листов крафт-бумаги на соответствующее число листов из самоклеящейся пленки ВПС-2,5 толщиной 0,5 мм. Замена производилась таким образом, чтобы толщина всех пластин из модифицированного пластика после прессования была одинаковой и равной  $10^{-2}$  м. После прессования расслоения пластин модифицированного пластика не наблюдалось.

Схемы поперечного сечения пластин приведены на рис. 1. Трехслойная пластина №1 имела один внутренний слой из ВПС-2,5, расположенный в равном удалении 4,75 мм от внешних краев (рис.1а). Пятислойные пластины №2 и №3 содержали по два интегрированных слоя из ВПС-2,5, размещенных на расстоянии 2,25 и 3 мм от внешних краев соответственно (рис.1б и рис.1в). Семислойная пластина №4 содержала три интегрированных слоя пленки ВПС-2,5, причем расстояние между соседними слоями пленки, а также между слоями пленки и краями пластины составляло 2,13 мм (рис.1г). В качестве контрольной была взята стандартная пластина НРЛ марки «Слопласт ТГ» толщиной  $10^{-2}$  м без внутренних демпфирующих слоев (рис.1д).

Испытания пластин проводились при их вертикальном вывешивании за соседние углы с помощью нити.

Выполнялись измерения входной вибровозбудимости пластин при ударе миниатюрным вибромолотком с датчиком контроля силы. Одна точка (1) удара находилась в геометрическом центре (ГЦ) пластин, другая (2) – на одинаковом расстоянии от ГЦ и одного из углов. Под входной вибровозбудимостью нами подразумевается величина  $A/F = 20 \lg(AF_0/a_0F)$ , дБ, где  $A$  – виброускорение,  $\text{м/с}^2$ , в точке приложения силы  $F$ ,  $\text{Н}$ ;  $a_0$  – пороговый уровень виброускорения,  $10^{-6}\text{м/с}^2$ ;  $F_0 = 1$ . Измерения  $A/F$ , дБ, выполнялись в диапазоне, ограниченном сверху частотой 6400 Гц.

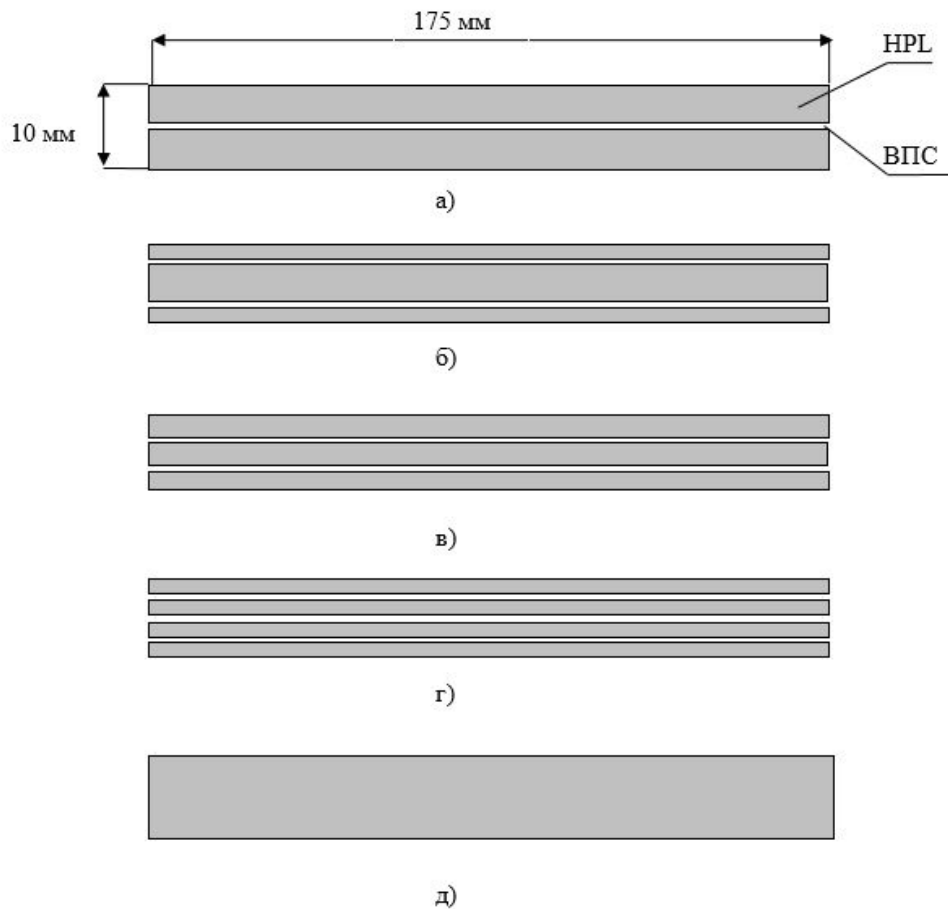


Рис. 1. Поперечные сечения испытанных пластин а) - пластина №1; б) - пластина №2; в) - пластина №3; г) - пластина №4; д) - пластина №5

## 2. Результаты измерений

На рис. 2 изображены узкополосные частотные ( $\Delta f = 1$  Гц) спектры входной вибровозбудимости  $A/F$ , дБ, всех испытанных пластин, измеренной в их геометрическом центре. (Соотношения уровней  $A/F$ , дБ, пластин в точке 2 аналогичны приведенным). Обращаясь к рис. 2, видим, что в спектре  $A/F$ , дБ, пластины №5 присутствуют четыре резонансных максимума с частотами 1206, 2860, 5100 и 5586 Гц. Включение в состав пластика полимерной пленки привело к изменению значений частот двух низших максимумов и к уменьшению уровней всех четырех максимумов вплоть до полного исчезновения двух последних в спектрах входной вибровозбудимости пластин № 1, 3 и 4.

Значения частот обоих низших резонансных максимумов в спектрах  $A/F$ , дБ, всех модифицированных пластин оказались меньше указанных значений соответствующих частот в спектре контрольной пластины №5.

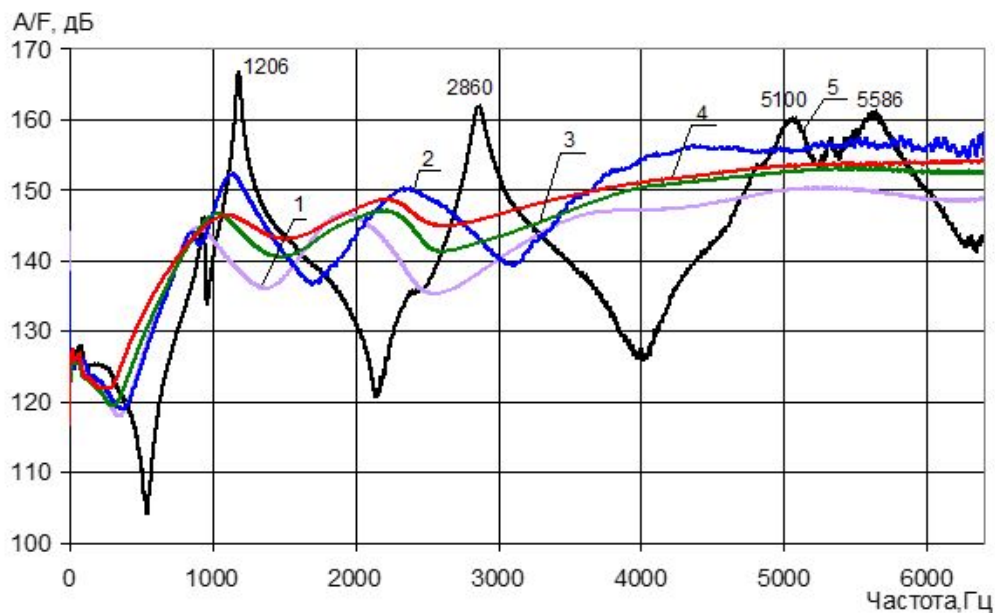


Рис. 2. Узкополосные частотные спектры входной вибровозбудимости испытанных пластин при возбуждении в ГЦ (1 - пластина №1; 2 - пластина №2; 3 - пластина №3; 4 - пластина №4; 5 - пластина №5)

Такое соотношение значений резонансных частот модифицированных пластин №1–4 и контрольной пластины №5 обусловлено, по-видимому, следующими факторами:

- меньшей толщиной наружного возбуждаемого жесткого слоя пластин №1–4 в сравнении с толщиной пластины №5; соответствующая зависимость значений резонансных частот возбуждаемого слоя от его толщины вытекает из общеизвестной пропорциональности этих значений квадратному корню отношения изгибной жесткости  $D = Eh^3/12(1 - \sigma^2)$  слоя к массе единицы его площади  $m = \rho h$  ( $h$  – толщина, м;  $E$ ,  $\sigma$  и  $\rho$  – модуль Юнга, Н/м<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона и плотность, кг/м<sup>3</sup>, материала);

- массовой нагрузкой на возбуждаемый слой со стороны примыкающего к нему через полимерную пленку жесткого слоя пластика; роль данного фактора существенно зависит не только от величины отношения толщин этих слоев, но и от места нахождения нагружающего слоя; так, массовая нагрузка этого слоя в пластине №1, имеющей наименьшие значения резонансных частот, на возбуждаемый слой такой же толщины, видимо, превышает нагрузку такого же слоя, расположенного симметрично срединной плоскости пластины №2, на меньший по толщине ее возбуждаемый слой;

- числом слоев и их толщиной; так, значения низших резонансных частот трехслойной (№1) и пятислойных (№2 и №3) пластин оказались различными, а их значения у пластин №3 и №4 – практически одинаковыми и более высокими в сравнении с резонансными частотами пластины №2.

Можно предположить, что все приведенные факторы влияют и на соотношение уровней входной вибровозбудимости испытанных пластин. Степень их влияния на эти уровни, как и на значения резонансных частот, с высокой вероятностью вряд ли однозначна. С учетом сказанного мы приведем лишь основные результаты определений соотношения уровней входной вибровозбудимости испытанных пластин.

Наименьшие уровни входной вибровозбудимости  $A/F$ , дБ, практически на всех частотах диапазона измерений зарегистрированы при испытаниях трехслойной пластины №1. Эти уровни на ее низших резонансных частотах (932 и 1820 Гц) меньше резонансных

уровней входной вибровозбудимости пластины №5 на 23 и 16 дБ соответственно. Самую малую эффективность имеет пластина №2 с тонкими наружными и в два раза более толстым внутренним слоем. Включение двух слоев полимерной пленки в эту пластину привело к уменьшению уровней  $A/F$ , дБ, на двух низших резонансных частотах (1150 и 2410 Гц) в сравнении с уровнями на соответствующих резонансных частотах пластины №5 лишь на 15 и 12 дБ соответственно. В спектре вибрации только пластины №2 содержится широкополосный третий резонансный максимум с частотой примерно 4300 Гц. Наличие этого максимума привело к существенному росту уровней  $A/F$ , дБ, пластины №2 в третьоктавной полосе со среднегеометрической частотой 4000 Гц в сравнении с соответствующими уровнями входной вибровозбудимости всех других пластин (рис. 3). В указанной полосе, содержащей антирезонансную частоту колебаний однородной пластины №5, уровни ее  $A/F$ , дБ, меньше уровней пластины №2 на  $\sim 18$  дБ.

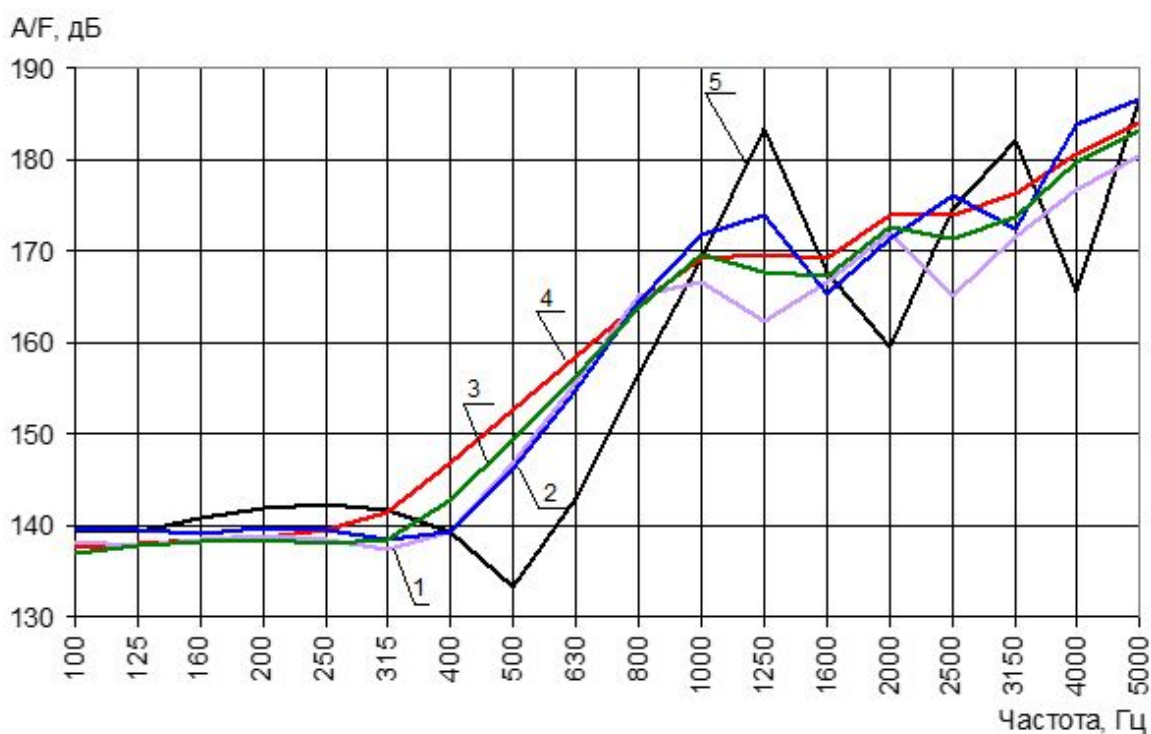


Рис. 3. Третьоктавные частотные спектры входной вибровозбудимости испытанных пластин при возбуждении в ГЦ (1 - пластина №1; 2 - пластина №2; 3 - пластина №3; 4 - пластина №4; 5 - пластина № 5)

Обращаясь к рис. 2, и рис. 3, видим, что введение пленки в структуру всех вариантов модифицированных пластин не привело к уменьшению уровней  $A/F$ , дБ, на дорезонансных частотах изгибных колебаний пластины №5 и в соответствующих третьоктавных полосах 500, 630 и 800 Гц. Однако отметим, что уровни входной вибровозбудимости всех пластин в соответствующем частотном диапазоне много меньше уровней на низшей резонансной частоте их изгибных колебаний. При этом, уровни  $A/F$ , дБ, всех модифицированных пластин на обеих низших резонансных частотах меньше соответствующих уровней  $A/F$ , дБ, контрольной пластины №5. Аналогичное соотношение уровней входной вибровозбудимости было зарегистрировано в третьоктавных полосах, в которые попадают резонансные частоты.

Потери колебательной энергии в модифицированных пластинах существенно превышали потери в контрольной пластине. Значения коэффициента потерь  $\eta$

вычислялись с использованием формулы  $\Delta f_p/f_p$ , где  $\Delta f_p$  - ширина максимума в спектрах входной вибровозбудимости пластин на уровне, меньшем на 3 дБ, чем его наибольшая величина на резонансной частоте  $f_p$ . На четырех резонансных частотах 1206, 2860, 5100 и 5586 Гц в спектрах  $A/F$ , дБ, пластины №5 значения  $\eta$  оказались равными 0,025; 0,029; 0,039 и 0,048 соответственно. Четко прослеживалась тенденция увеличения потерь в пластине №5 с ростом частоты. Значения  $\eta$  на первой и второй резонансных частотах в спектрах  $A/F$ , дБ, модифицированных пластин находились в пределах 0,57–0,62 и 0,27–0,32.

Повышение потерь колебательной энергии включением в ламинат полимерной пленки привело к уменьшению уровней не только входной вибровозбудимости, но и звукоизлучения пластин №1–4 в сравнении с пластиной №5.

В качестве примера на рис. 4 приведены уровни звукоизлучения пластин №3 и №5. Измерения были выполнены на расстоянии 1 м от не возбуждаемой вибромолотком поверхности пластин напротив их геометрического центра.

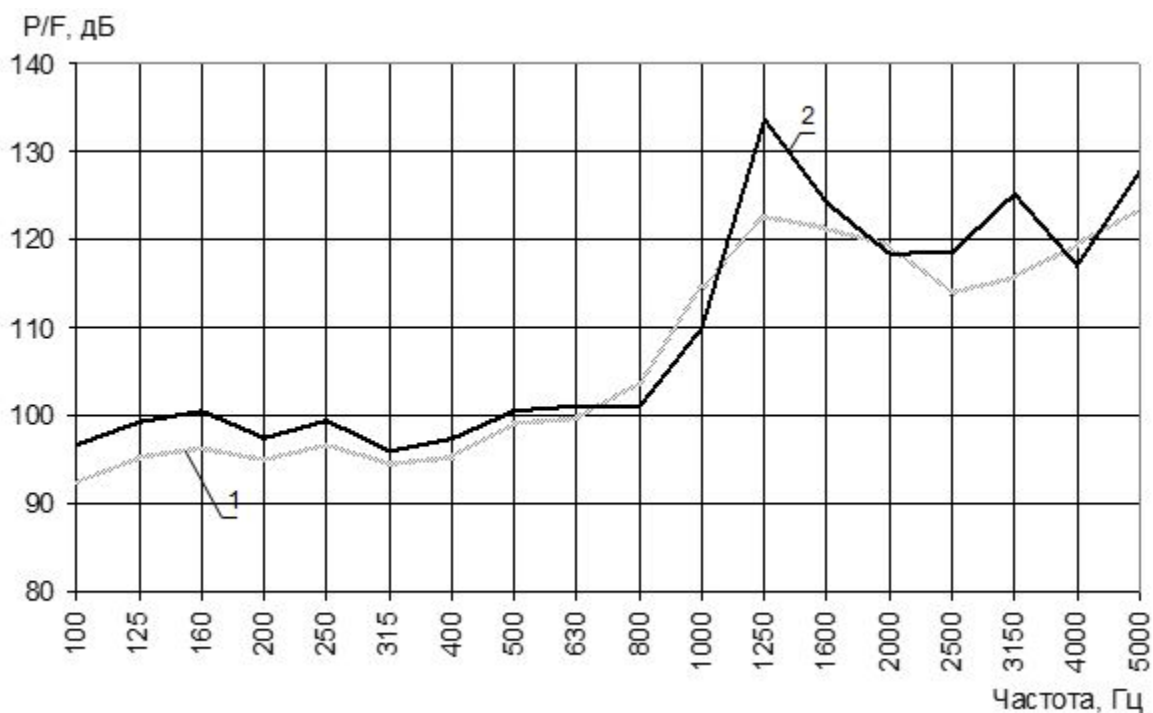


Рис. 4. Третьоктавные уровни звукоизлучения пластин №3 (кривая 1) и №5 (кривая 2) при возбуждении в ГЦ

Приведенные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о существенно лучших акустических характеристиках пластин из ламината типа НРЛ с включенными в него слоями полимерной пленки.

## Заключение

Основными результатами выполненной работы являются следующие:

- получены модифицированные пластики типа НРЛ, содержащие 1, 2 и 3 интегрированных внутренних слоя из тонких, термопластичных, самоклеящихся пленок на основе поливинилацетата ВПС-2,5;
- получены и проанализированы результаты измерений вибрации и звукоизлучения контрольной и модифицированных пластин пластиков типа НРЛ;
- наименьшие уровни входной вибровозбудимости имеет трехслойная пластина с одним слоем пленки ВПС-2,5; на двух низших резонансных частотах эти уровни меньше соответствующих уровней вибровозбудимости не модифицированной пластины на 23 и 16 дБ;
- значения коэффициента потерь колебательной энергии на двух низших резонансных частотах модифицированных пластин на порядок больше, чем в контрольной.

## Список литературы

1. Ed. Malcolm J. Crocker . Handbook of noise and vibration control // John Wiley & Sons, Inc. 2007, P.1584, ISBN:0471395994.
2. E.N. Kablov, V.A. Sagomonova, A.E. Sorokin, V.V. Tselikin, A.I. Gulyaev A Study of the Structure and Properties of Polymer Composite Materials with Integrated Vibration Absorbing Layer // Polymer Science, Series D. 2020. № 13 (3). p.335–340. DOI: 10.1134/S1995421220030090.
3. Платонов М.М., Шульдешов Е.М., Нестерова Т.А., Сагомонова В.А. Акустические полимерные материалы нового поколения // Труды ВИАМ. 2016. Т. 40. № 4. С. 76–84. dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016- 0-4-9-9.
4. Сагомонова В.А., Сытый Ю.В. Основные принципы создания вибропоглощающих материалов авиационного назначения // Труды ВИАМ. 2013. № 11. С. 3.
5. Электронный ресурс: [www.sloplast.ru/products/](http://www.sloplast.ru/products/).
6. Скуратова Т.Б., Кириллов С.Е., Сятковский А.И. Диссипативные свойства полимерных пленок и композитных материалов на основе поливинилацетата // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92, № 7. С. 881–887.
7. Сятковский А.И., Рюткянен Е.А., Кудаев А.В., Демпфирование в трехслойных конструкциях металл-полимер-металл с термопластичной пленкой из поливинилацетата // Noise Theory and Practice, 2022, Vol. 8, № 2, P. 24–34.
8. Ever J. Barbero Introduction to composite materials design. Second Ed. // Taylor&Fracis Group. LLC. 2011. P. 509.
9. Розенберг М.Э. Полимеры на основе винилацетата. Л.: Химия, 1983. 176 с.



## References

1. Ed. Malcolm J. Crocker . Handbook of noise and vibration control // John Wiley & Sons, Inc. 2007, P.1584, ISBN:0471395994.
2. E.N. Kablov, V.A. Sagomonova, A.E. Sorokin, V.V. Tselikin, A.I. Gulyaev A Study of the Structure and Properties of Polymer Composite Materials with Integrated Vibration Absorbing Layer // Polymer Science, Series D. 2020. № 13 (3). p.335–340. DOI: 10.1134/S1995421220030090.
3. Platonov M.M., Shuldeshov E.M., Nesterova T.A., Sagomonova V.A. Acoustic polymeric materials of a new generation // Proceedings of VIAM. 2016. V. 40. No. 4. P. 76-84. dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-4-9-9
4. Sagomonova V.A., Syty Yu.V. The basic principles of creating vibration-absorbing aviation materials // Proceedings of VIAM. 2013. No. 11. P. 3.
5. Electronic resource: [www. sloplast.ru /products/](http://www.sloplast.ru/products/).
6. Skuratova T.B., Kirillov S.E., Syatkovsky A.I. Dissipative properties of polymer films and composite materials based on polyvinyl acetate // Magazine applied chemistry. 2019. V. 92. No 7. P. 881-887.
7. Syatkovsky A.I., Ryutkyanen E.A., Kudaev A.V., Damping in three-layer metal-polymer-metal constructions with polyvinyl acetate thermoplastic film // Noise Theory and Practice, 2022, Vol. 8, № 2, P. 24–34.
8. Ever J. Barbero Introduction to composite materials design. Second Ed. // Taylor&Fracis Group. LLC. 2011. P. 509.
9. Rosenberg M.E. Polymers based on vinyl acetate. L.: Chemistry, 1983. 176 p.