

УДК 539.3+629.7.01

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ С ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ

*В.Н. Паймушин, Р.К. Газизуллин, А.А. Шаранов*

### Аннотация

Представлены результаты определения параметров звукоизоляции прямоугольной пластины с энергопоглощающим покрытием, полученные на основе экспериментов в акустической лаборатории реверберационного типа и предназначенные для верификации результатов теоретических исследований. Предложенная методика проведения эксперимента позволила получить как осредненные значения параметра звукоизоляции пластины, находящейся между камерами высокого и низкого уровней, так и поля распределения параметра звукового давления в камере низкого уровня. Полученные результаты сравниваются с аналогичными, полученными для пластин без покрытий.

**Ключевые слова:** многослойная пластина, звукоизоляция, энергопоглощающее покрытие, акустическая лаборатория, звуковое давление, экспериментальное исследование.

### Введение

В последние несколько десятилетий в связи с ужесточением правовых норм по уровню воздействующего на человека шума особое значение приобрели проблемы, связанные с определением акустических характеристик изделий, сделав их одним из важнейших критериев при проектировании. Учет этих характеристик особенно важен в изделиях аэрокосмической промышленности, в которых, с одной стороны, необходимо обеспечить акустический комфорт среды, что способствует снижению утомляемости пассажиров, повышению работоспособности экипажа и, как следствие, улучшению конкурентной способности транспортного средства. С другой стороны, при проектировании летательных аппаратов чрезвычайно важным является требование по снижению веса конструкций. Однако обеспечение последнего зачастую приводит к повышению уровней шума и вибрации.

Одним из возможных решений указанной проблемы является, по-видимому, использование вместо традиционных конструкционных материалов (металлы и их сплавы, современные композитные материалы) многослойных структур, в том числе структур с энергопоглощающим покрытием (покрытием, имеющим высокие демпфирующие свойства). Несмотря на то что практически во всех изданиях справочного или аналогичного характера [1, 2] указывается, что многослойные панели обладают хорошими звукоизоляционными и звукопоглощающими свойствами, механизмы снижения уровня шума данными структурами плохо изучены и зачастую неверно трактуются [3, 4]. К тому же в большинстве предложенных методов как аналитического [5, 6], так и численного [7–9] анализа данных свойств рассматриваются исключительно так называемые панели типа «сэндвич». Указанные выше методы для анализа структур с энергопоглощающим покрытием не подходят, так как не учитывают демпфирующие свойства материала. С целью восполнения этого

пробела в [3, 4] рассматривается связанная задача о прохождении плоской звуковой волны сквозь композитную пластину, покрытую вторым демпфирующим слоем с большим логарифмическим декрементом колебаний. Однако полученные в ней результаты имеют сугубо теоретический характер и требуют сравнения с результатами соответствующих экспериментов.

В развитие результатов статей [10, 11], а также с целью верификации результатов работ [3, 4] ниже представлены результаты экспериментального определения параметров звукоизоляции прямоугольной пластины с энергопоглощающим покрытием и без него, а также результаты определения поля звукового давления в камере низкого уровня акустической лаборатории реверберационного типа.

### 1. Методика экспериментальных исследований

В ходе экспериментальных исследований определялось влияние энергопоглощающего покрытия на звукоизоляционные свойства пластины. Для этого в лабораторных условиях исследовались прямоугольные плоские пластины, выполненные из стали 20 и имеющие толщину  $t = 3$  мм, длину  $a = 480$  мм, ширину  $b = 560$  мм, как с энергопоглощающим покрытием, так и без него. В качестве покрытия использовалась резиновая пластина марки 2Н-1-МБС-С толщиной  $t_p = 2$  мм. Данная резина при малых деформациях имеет следующие механические характеристики: статический модуль упругости  $E = 5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.36$ . При испытаниях пластина закреплялась между камерами высокого и низкого уровней (давлений) (КВУ и КНУ) в соответствии со схемой, изображенной на рис. 1. Всего было проведено четыре серии испытаний для различных видов образцов: 1-я серия – однослойная пластина без энергопоглощающего покрытия; 2-я серия – двухслойная пластина с энергопоглощающим покрытием, расположенным со стороны КНУ; 3-я серия – двухслойная пластина с энергопоглощающим покрытием, расположенным со стороны КВУ, 4-я серия – трехслойная пластина с энергопоглощающими покрытиями, расположенными с обеих сторон.

Испытания проведены в акустической лаборатории, удовлетворяющей требованиям ГОСТ 27296-87. Она включает в себя две смежные камеры высокого и низкого уровней, в проем между которыми устанавливается испытываемый образец (рис. 1), а также измерительно-управляющий комплекс с передающей и приемной системами. Камеры имеют следующие значения площадей поверхности  $S_k$  и объемов  $V_k$ :  $S_k = 13$  м<sup>2</sup>,  $V_k = 35$  м<sup>3</sup> (высокого уровня) и  $S_k = 11$  м<sup>2</sup>,  $V_k = 31$  м<sup>3</sup> (низкого уровня). В них в соответствии с ГОСТ 27296-87 обеспечена минимальная возможность косвенной передачи звука и проникновения посторонних звуков. При этом для имитации шарнирного опирания по контуру пластины при проведении эксперимента установка образцов в проем осуществлялась с использованием войлочной прокладки (рис. 1, б), а также преднамеренно уменьшалась сила прижатия образца.

Исследование распределения звуковых давлений заключалось в последовательном их измерении в камерах испытательной лаборатории и сравнении их средних уровней в определенных полосах частот с последующим вычислением показателей звукоизоляции образцов. Измерения проводились в третьоктавных полосах частот  $f$ : 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150 Гц. Параметр звукоизоляции  $R_p$  воздушного шума ограждающими конструкциями в соответствии с указанным стандартом рассчитывался по формуле

$$R_p = L_1 - L_2 + 10 \lg (S/A_2), \quad (1)$$

где  $L_1, L_2$  – средние уровни звукового давления (дБ) в камерах высокого и низкого

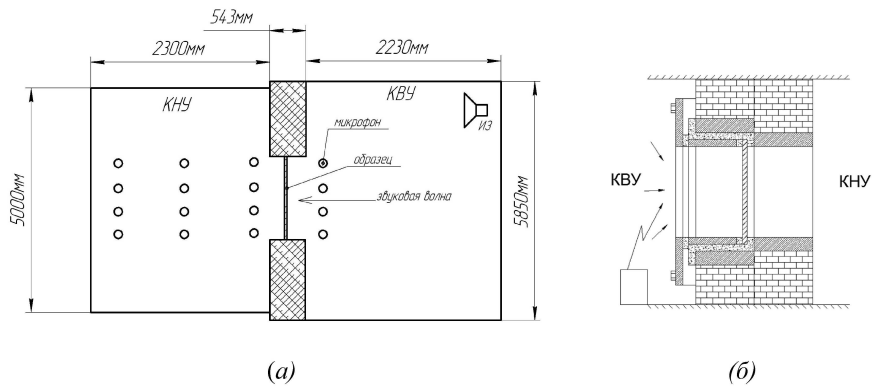


Рис. 1. Схема акустической лаборатории (а) и способ закрепления образца в проеме (б)

уровней соответственно;  $S$  – площадь ( $\text{м}^2$ ) поверхности испытываемого образца;  $A_2$  – эквивалентная площадь ( $\text{м}^2$ ) звукопоглощения камеры низкого уровня.

Входящие в (1) средние уровни звукового давления  $L_k$  находились по формуле

$$L_k = 10 \lg \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1L_j} \right), \quad k = 1, 2, \quad (2)$$

где  $L_j$  – уровень звукового давления в  $j$ -й точке;  $n$  – число точек измерения.

Эквивалентная площадь звукопоглощения камеры низкого уровня  $A_2$  определялась по формуле

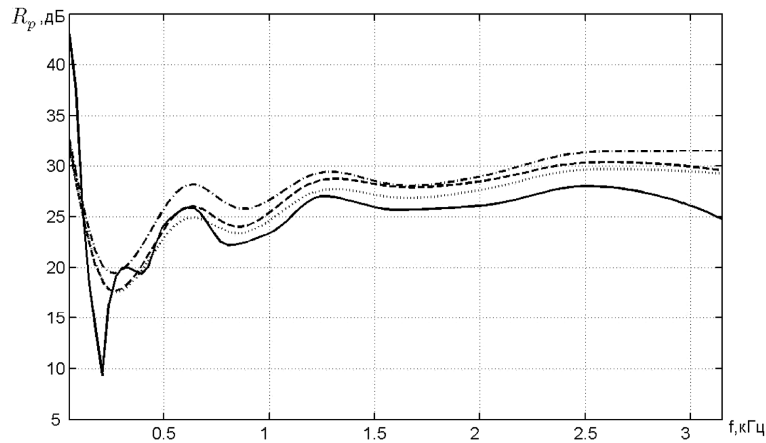
$$A_2 = \frac{0.16 V_2}{T_2}, \quad (3)$$

где  $T_2$  – время реверберации (с), измеряемое в соответствии с ГОСТ 26417-85;  $V_2$  – объем ( $\text{м}^3$ ) КНУ; 0.16 – эмпирический коэффициент (с/м).

## 2. Результаты экспериментальных исследований

На рис. 2 приведены результаты физических экспериментов, полученные на основе описанной выше методики и соответствующие измерению звукового давления микрофонами, расположенными равномерно в пределах объемов камер (сплошной линией обозначен график  $R_p$ , соответствующий однослойной пластине без энергопоглощающего покрытия; штриховой линией – двухслойной пластине с энергопоглощающим покрытием, расположенным со стороны КНУ; пунктирной линией – двухслойной пластине с энергопоглощающим покрытием, расположенным со стороны КВУ; штрих-пунктирной линией – трехслойной пластине с энергопоглощающими покрытиями, расположенными с обеих сторон).

Как видно из графиков (рис. 2), энергопоглощающие покрытия ощутимо влияют на звукоизоляционные свойства пластины (особенно сильное влияние заметно на частотах  $f < 250$  Гц). Как и ожидалось, на большей части частотного спектра максимального коэффициента звукоизоляции удалось добиться при использовании пластины с энергопоглощающим покрытием, расположенным с обеих сторон, хотя на частотах  $f < 200$  Гц образцы с покрытием демонстрируют практически идентичные результаты, а наиболее эффективна в данном случае пластина без энергопоглощающего покрытия. При этом для увеличения среднего коэффициента звукоизоляции пластины с энергопоглощающим слоем, расположенным только с одной из сторон, эффективнее расположить ее резиновым покрытием в сторону КНУ.

Рис. 2. Коэффициент звукоизоляции образцов  $R_p$ 

Стоит также отметить, что значительное ухудшение звукоизоляционных свойств пластины без энергопоглощающего покрытия в районе  $f = 200$  Гц обусловлено, по-видимому, резонансными процессами, а также нежестким закреплением образцов; такое ухудшение не так ярко выражено у панелей с энергопоглощающим покрытием. При этом изменение резонансной частоты последних вызвано, помимо прочего, увеличением их массы.

Для более детального исследования, помимо определения среднего значения  $R_p$ , были проведены экспериментальные исследования по нахождению закона распределения звукового давления в камере низкого уровня в точках горизонтальной плоскости, проходящей через центр испытываемой пластины. Для этого при проведении эксперимента микрофоны поочередно располагались в 25 точках КНУ при неизменном положении микрофонов в КВУ вблизи испытываемого образца (рис. 2). В результате была получена экспериментальная зависимость  $R_p(x, z)$ .

На рис. 3–19 представлены экспериментальные зависимости  $R_p(x, z)$ , найденные для третьоктавной полосы частот, для (а) пластины без энергопоглощающего покрытия, (б) пластины с энергопоглощающим покрытием, расположенным со стороны КНУ, (в) пластины с энергопоглощающим покрытием, расположенным со стороны КВУ, (г) пластины с энергопоглощающими покрытиями, расположенными с обеих сторон.

Результаты, приведенные на рис. 3–19, указывают на весьма сложный закон распределения звукового давления в объеме КНУ. При этом характер распределения давлений меняется для различных типов образцов. Следует также заметить, что вопреки отмеченной выше закономерности (средний коэффициент звукоизоляции пластины с энергопоглощающим слоем, расположенным со стороны КНУ, выше, чем у аналогичной панели со слоем со стороны КВУ) законы распределения  $R_p(x, z)$  для двух случаев значительно отличаются. Так, на большей части спектра исследуемых частот ( $f > 250$  Гц) для случая пластины с энергопоглощающим слоем, расположенным со стороны КНУ, наблюдается значительное снижение коэффициента  $R_p(x, z)$  в непосредственной близости от пластины, что свидетельствует о высоком уровне звукового давления в данной области. В то же время в случае пластины с энергопоглощающим слоем, расположенным со стороны КВУ, закон распределения  $R_p(x, z)$  более однороден, и отмеченного снижения явно не наблюдается. В связи с этим решение о расположении энергопоглощающего слоя в составе многослойных пластин должно приниматься исходя из спектра решаемых задач.

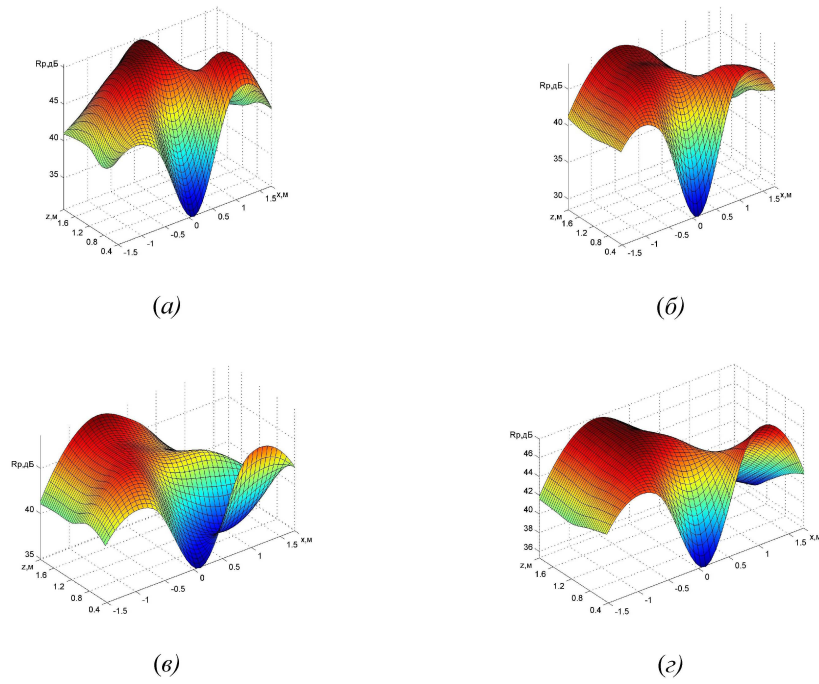


Рис. 3. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 50$  Гц

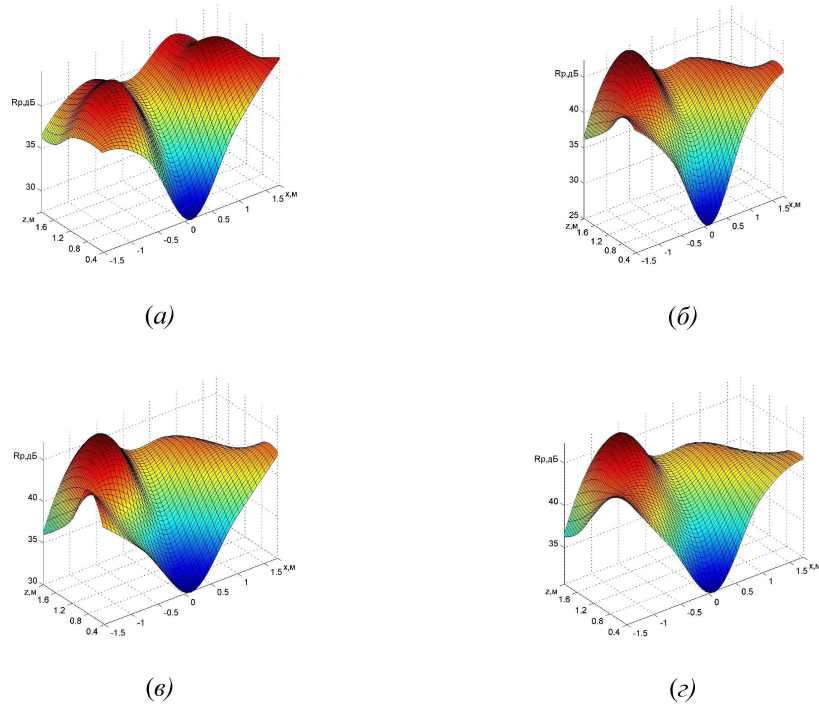


Рис. 4. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 63$  Гц

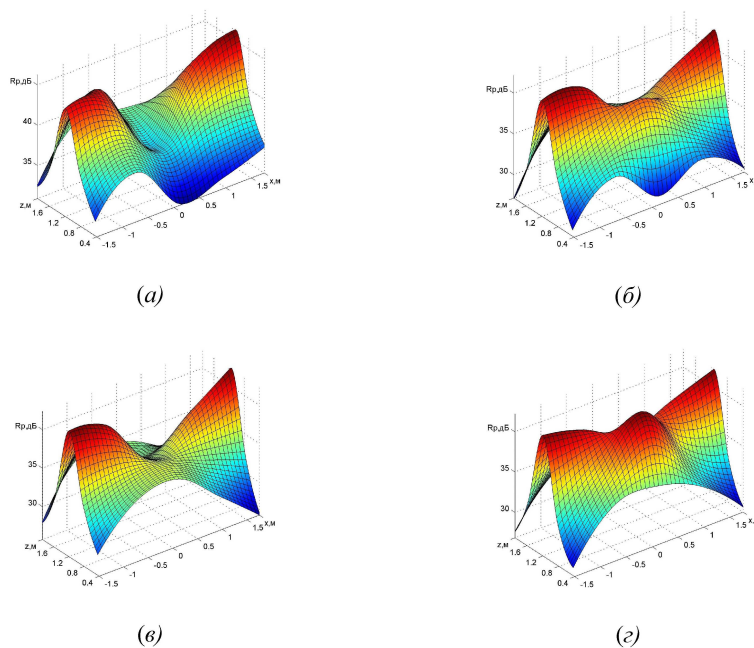


Рис. 5. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 80$  Гц

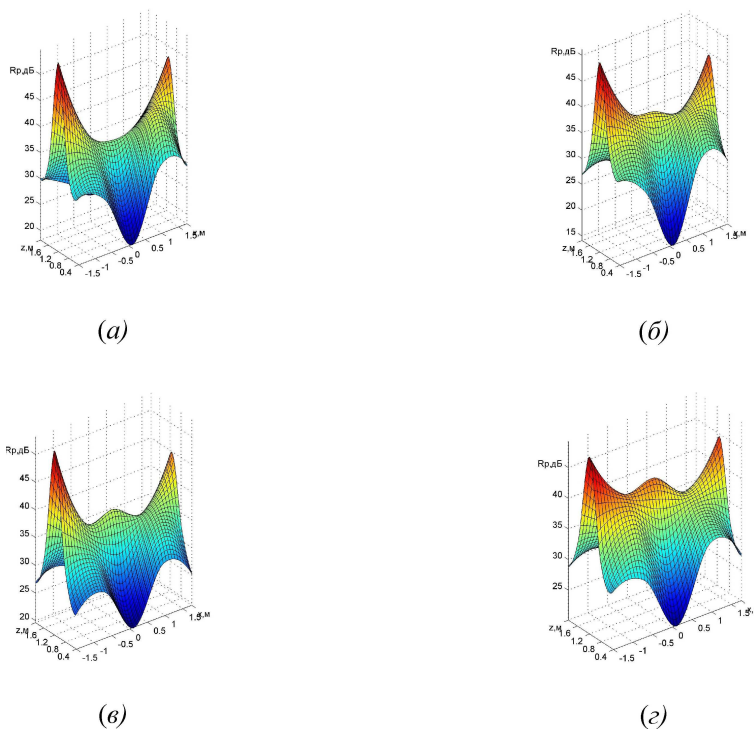


Рис. 6. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 100$  Гц

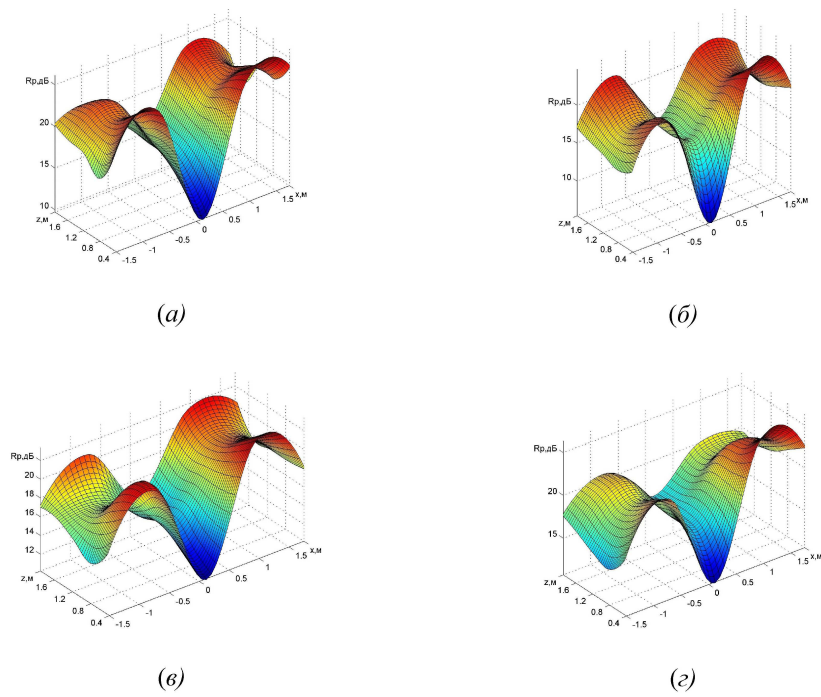


Рис. 7. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 125$  Гц

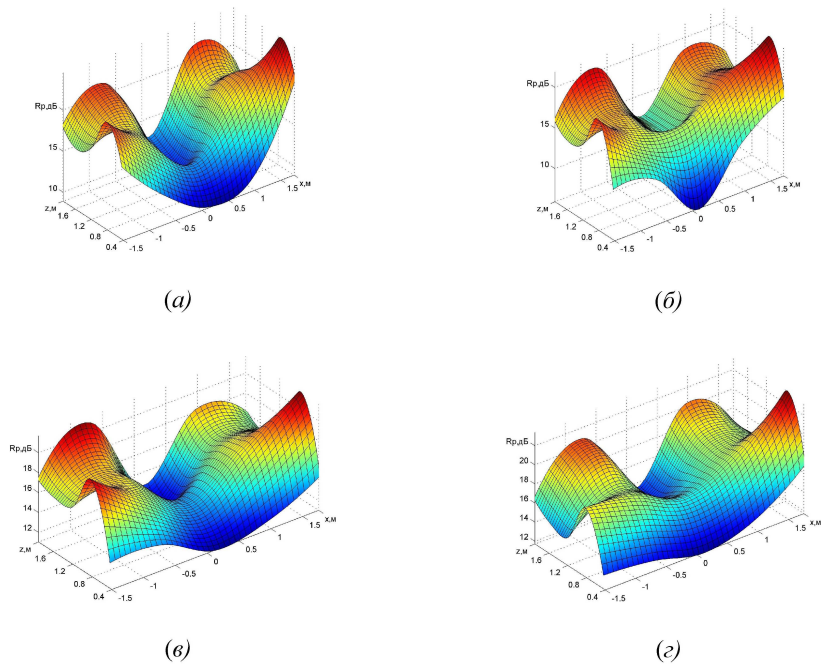


Рис. 8. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 160$  Гц

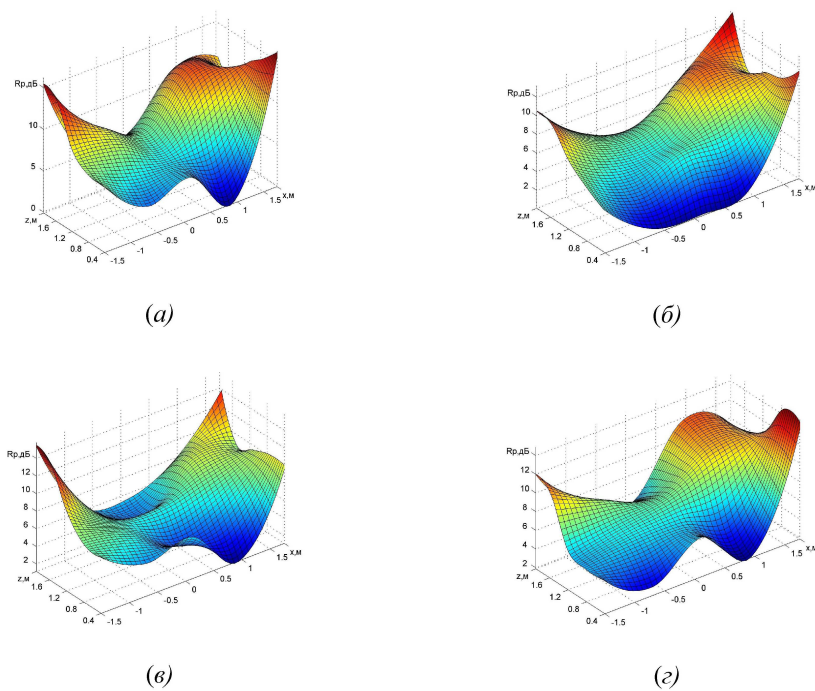


Рис. 9. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 200$  Гц

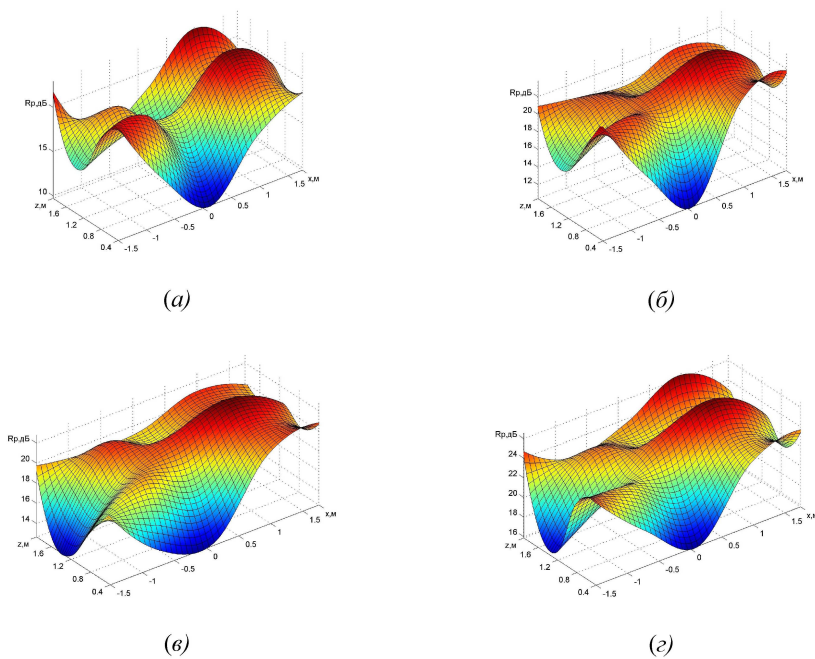


Рис. 10. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 250$  Гц



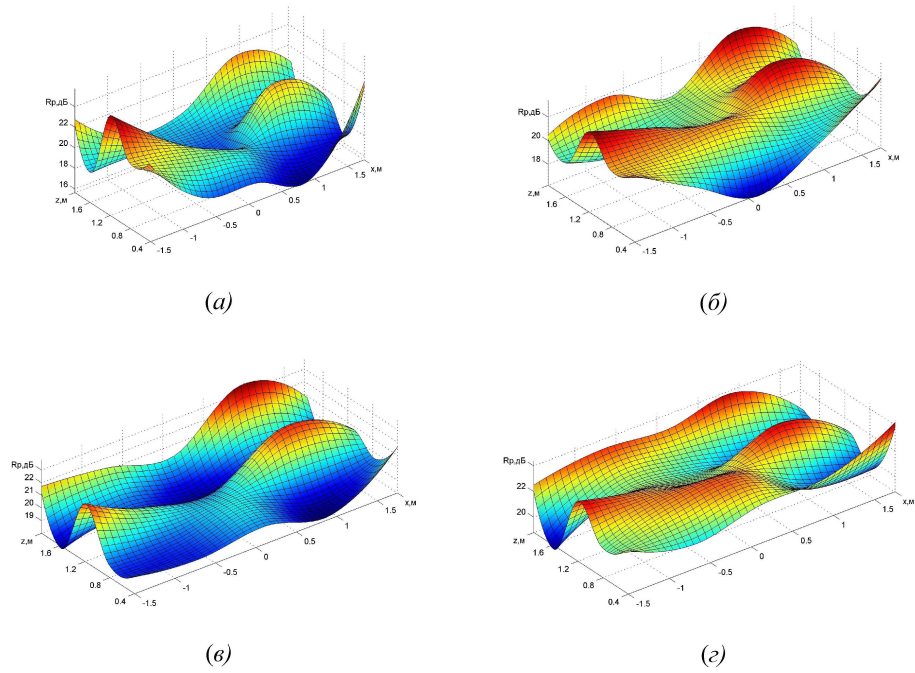


Рис. 11. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 315$  Гц

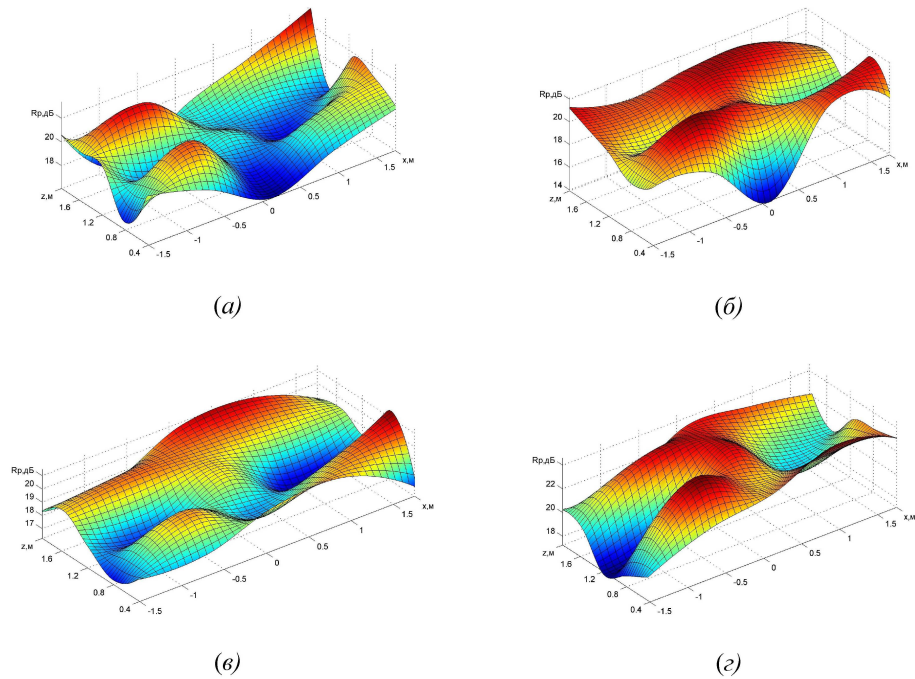


Рис. 12. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 400$  Гц

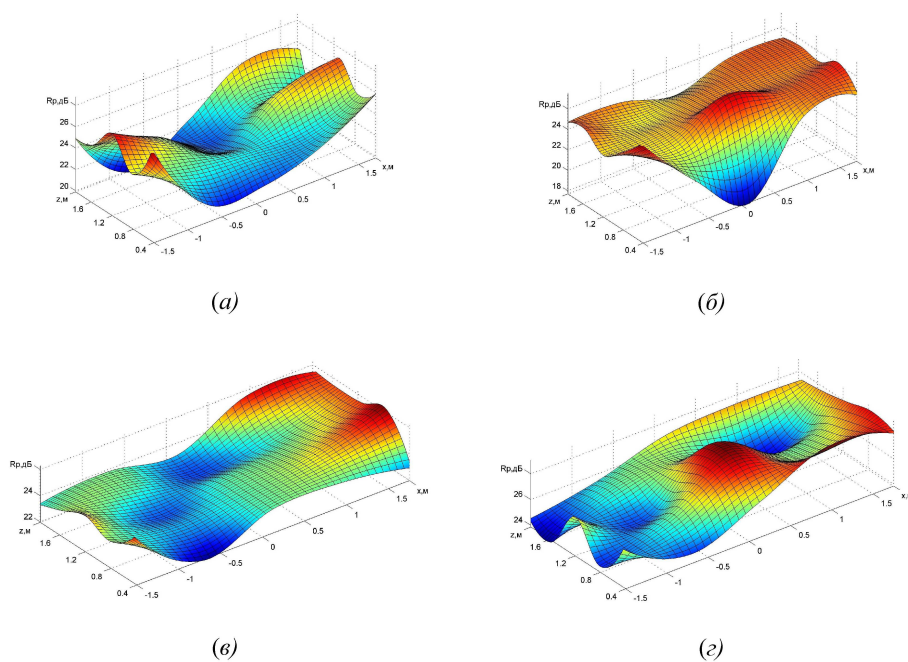


Рис. 13. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 500$  Гц

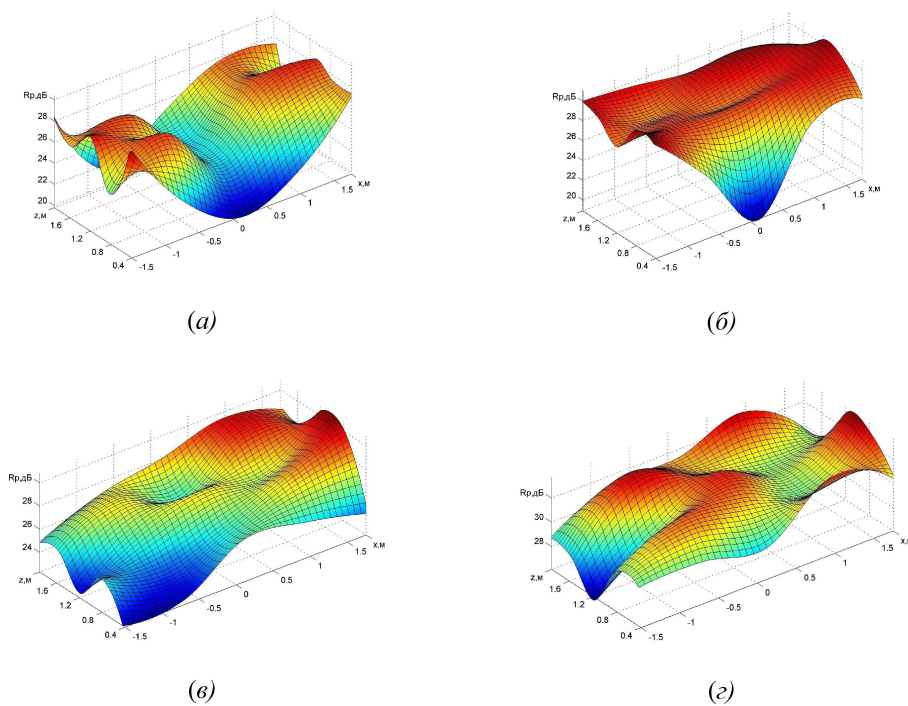


Рис. 14. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 630$  Гц

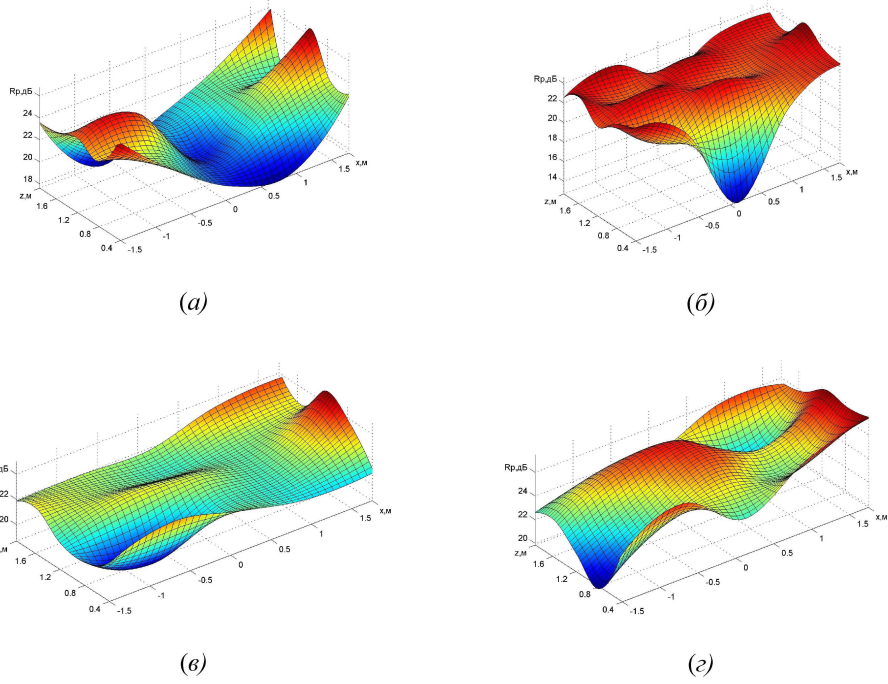


Рис. 15. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 800$  Гц

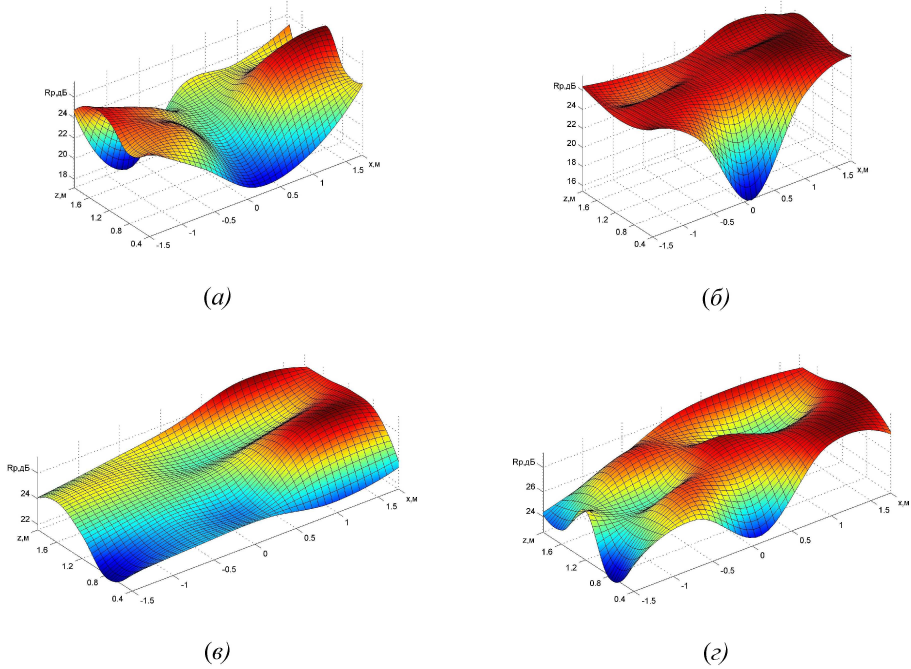


Рис. 16. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 1000$  Гц

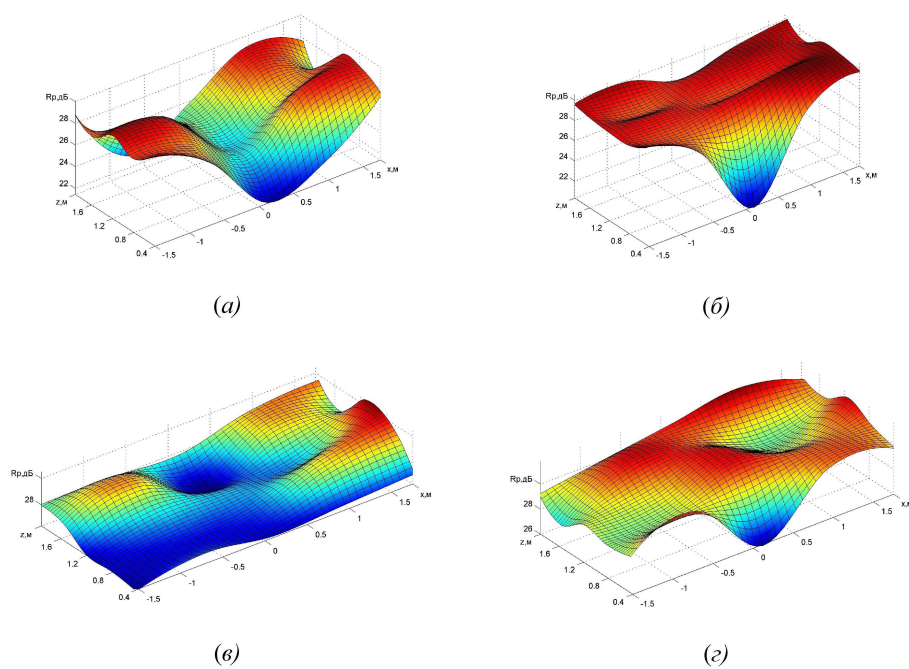


Рис. 17. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 1250$  Гц

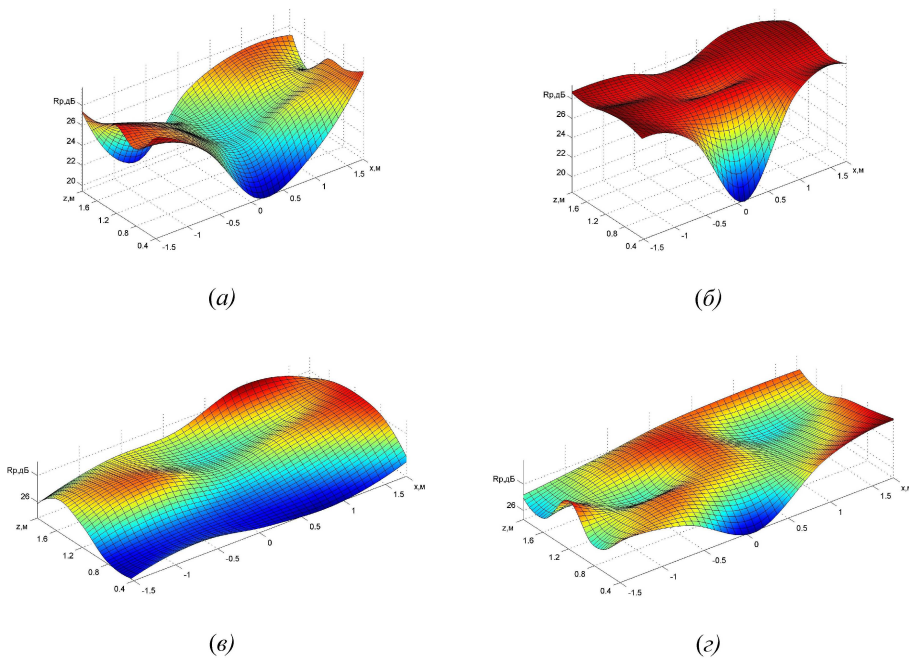


Рис. 18. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 1600$  Гц

### Заключение

Полученные результаты показывают, что энергопоглощающие покрытия, наклеенные на тонкостенную пластину, позволяют улучшить их звукоизоляционные

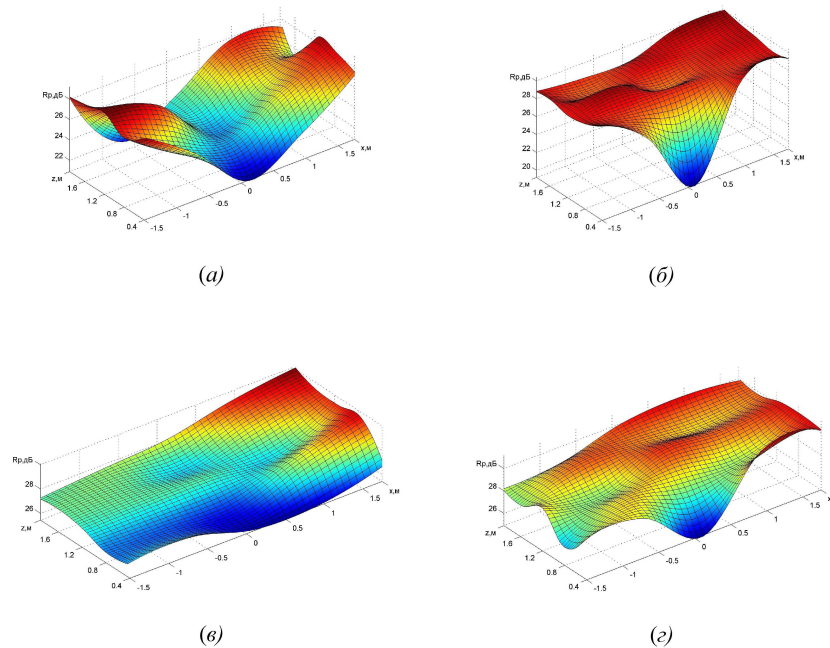


Рис. 19. Распределение параметра звукового давления  $R_p(x, z)$  в КНУ при частоте  $f = 2000$  Гц

свойства, существенно влияя при этом на характер распределения звукового давления после прохождения звуковой волны сквозь пластину. В частности, использование в качестве энергопоглощающего покрытия резиноподобных материалов, обладающих высокими внутренними демпфирующими свойствами, приводит к сглаживанию значений параметра звукоизоляции, а следовательно, и к сглаживанию уровня звукового давления в объеме КНУ. Полученные результаты показывают, что предложенная в [3, 4] математическая модель требует уточнения, так как теоретические решения задач, получаемые на ее основе, не позволяют учитывать наблюдаемую в физических экспериментах разницу в характере распределения давлений в случае смены направленности энергопоглощающего покрытия панелей с одним демпфирующим слоем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00667).

### Summary

*V.N. Paimushin, R.K. Gazizullin, A.A. Sharapov.* Experimental Determination of Sound Transmission Loss Indices of a Rectangular Plate with Energy-Absorbing Coating.

This paper presents the results of experimental determination of sound transmission loss indices of a rectangular plate with energy-absorbing coating, which were obtained in the reverberation acoustic laboratory and intended to verify the data of theoretical studies. The proposed experimental methodology allowed to receive not only the average values of sound transmission loss indices of the plate placed between the high and low pressure chambers, but also the field of sound pressure distribution indices in the low pressure chamber. The results are compared with the similar ones for plates without coating.

**Keywords:** laminated plate, sound insulation, energy-absorbing coating, acoustic laboratory, sound pressure, experimental investigation.

**Литература**

1. Берсудский В.Е., Крысин В.Н., Лесных С.И. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.
2. Ендогур А.И., Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование. – М.: Машиностроение, 1986. – 200 с.
3. Паймушин В.Н. Об учете внутреннего демпфирования материалов слоев в задачах акустопругости двухслойных пластин // Динамика и виброакустика машин: Сб. докл. второй междунар. науч.-техн. конф. – Самара: СГАУ, 2014. – С. 115–124.
4. Бадриев И.Б., Макаров М.В., Паймушин В.Н. О взаимодействии композитной пластины, имеющей вибропоглощающее покрытие, с падающей звуковой волной // Изв. вузов. Матем. – 2015. – № 3. – С. 75–82.
5. Moore J.A. Sound transmission loss characteristics of three layer composite wall constructions: PhD Thesis. – Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1975. – 202 p.
6. El-Raheb M., Wagner P. Transmission of sound across a trusslike periodic panel; 2-D analysis // J. Acoust. Soc. Am. – 1997. – V. 102, No 4. – P. 2176–2183.
7. Ruzzene M. Vibration and sound radiation of sandwich beams with honeycomb truss core // J. Sound. Vib. – 2004. – V. 277, No 4–5. – P. 741–763.
8. Kim Y.-J., Han J.-H. Identification of acoustic characteristics of honeycomb sandwich composite panels using hybrid analytical/finite element method // J. Vib. Acoust. – 2013. – V. 135, No 1. – Art. 011006, P. 1–11.
9. Wang T., Li S., Rajaram S., Nutt S.R. Predicting the sound transmission loss of sandwich panels by statistical energy analysis approach // J. Vib. Acoust. – 2010. – V. 132, No 1. – Art. 011004, P.1–7.
10. Паймушин В.Н., Газизуллин Р.К. Исследование звукоизоляционных свойств абсолютно жесткой пластины, помещенной на деформируемых опорных элементах между двумя преградами // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2013. – Т. 155, кн. 3. – С. 126–141.
11. Паймушин В.Н., Газизуллин Р.К., Шарапов А.А. Математическое моделирование и экспериментальное исследование прохождения звуковой волны сквозь деформируемую пластину, находящуюся между двумя камерами // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2014. – Т. 156, кн. 2. – С. 102–119.

Поступила в редакцию  
18.12.14

---

**Паймушин Виталий Николаевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры прочности конструкций, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева; главный научный сотрудник, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: [vpajmushin@mail.ru](mailto:vpajmushin@mail.ru)

**Газизуллин Руслан Камилевич** – аспирант кафедры прочности конструкций, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия.

E-mail: [gazizullin.rk@yandex.ru](mailto:gazizullin.rk@yandex.ru)

**Шарапов Адель Альбертович** – аспирант кафедры прочности конструкций, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия.

E-mail: [dsm@dsm.kstu-kai.ru](mailto:dsm@dsm.kstu-kai.ru)