

# Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.784

doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-60-68

## Отклонения от гипотезы Фурье, выявленные при низкочастотных испытаниях коробчатой оболочки

С.В. Аринчев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Deviations from the Fourier Hypothesis, Detected during the Low Frequency Modal Analysis of the Box-Shell

S.V. Arinchev

Bauman Moscow State Technical University

Приведены результаты испытаний коробчатой оболочки в частотном диапазоне 10...50 Гц. В зоне Фурье коробчатой оболочки пики амплитудно-частотных характеристик датчиков, установленных в разных точках изделия, лежат на одной вертикальной прямой. Анализ результатов частотных испытаний выявил существенные отклонения от гипотезы Фурье. Показано, что в резонансе (одного и того же тона) разные точки коробчатой оболочки колеблются с различными частотами. Частотные сдвиги составляют около 2 Гц.

**Ключевые слова:** разделение переменных, гипотеза Фурье, частотный сдвиг

The article presents the results of box-shaped shell tests in the frequency range of 10...50 Hz. According to the Fourier hypothesis, the peaks of the amplitude-frequency characteristics corresponding to different points of the box-like shell are to lie on the same vertical straight line. An analysis of the results of frequency tests revealed significant deviations from the Fourier hypothesis. It is shown that in resonance (of the same tone) different points of the box shell oscillate with different frequencies. Frequency shifts are about 2 Hz.

**Keywords:** separation of variables, Fourier hypothesis, frequency shift

Краевые задачи по теории колебаний решают методом разделения переменных. Разделить переменные — значит, принять гипотезу Фурье о том, что в резонансе заданного тона все точки изделия колеблются с одной и той же частотой (частотой резонанса). На практике при идентификации расчетных моделей летательных аппа-

ратов отклонения от гипотезы Фурье считают погрешностью и минимизируют.

**Постановка задачи.** О современном состоянии методологии экспериментального модального анализа упругих конструкций можно судить по трудам конференций [1, 2]. В этих

докладах краевые задачи по теории колебаний решены методом разделения переменных Фурье. Авторы приняли гипотезу Фурье, возможные отклонения от нее считают погрешностью и минимизируют. Решение задачи сведено к рассмотрению амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) одного датчика.

Экспериментальные АЧХ часто оказываются зашумленными. В работе [3] предложен метод стабилизационных диаграмм для подавления зашумленности АЧХ отдельных датчиков. Принята гипотеза Фурье. Решение проблемы сведено к рассмотрению АЧХ одного датчика.

В диссертации [4] краевая задача по теории колебаний решена методом разделения переменных. Принята гипотеза Фурье. Для модального анализа отсека фюзеляжа летательного аппарата использованы десять датчиков. Выявлено отклонение от указанной гипотезы. Частотный сдвиг, составивший 3 Гц, интерпретирован как погрешность и минимизирован до 1,4 Гц.

В статье [5] предложена методика экспериментального модального анализа изделий, изготовленных из пластика на 3d-принтере. Принята гипотеза Фурье. Решение проблемы сведено к рассмотрению АЧХ одного датчика.

В работе [6] для экспериментального модального анализа использован метод ступенчатого изменения частоты возбуждения. Принята гипотеза Фурье. Проблема решена путем рассмотрения АЧХ одного датчика.

В публикации [7] выполнен высокочастотный модальный анализ резцедержателя токарного станка. Принята гипотеза Фурье. Решение проблемы сведено к рассмотрению высокочастотной АЧХ одного датчика.

В работе [8] предложена методика идентификации параметров композитного материала по результатам экспериментального модального анализа образца. Принята гипотеза Фурье. Задача решена путем анализа АЧХ одного лазерного датчика.

В трудах [9, 10] описана методика экспериментального модального анализа малоразмерных компонентов микроэлектронных систем с помощью лазерного оборудования. Принята гипотеза Фурье. Решение задачи сведено к рассмотрению АЧХ одного лазерного датчика.

В статье [11] предложено идентифицировать модели не по форме колебаний и частоте, а по переходному процессу (нестационарному отклику на нормативное воздействие). Такой

подход имеет преимущество перед традиционным при наличии существенных отклонений от гипотезы Фурье в эксперименте.

В работе [12] общетеоретического характера даны базовые рекомендации по решению задач экспериментального модального анализа. Принята гипотеза Фурье. Решение проблемы сведено к рассмотрению АЧХ одного датчика.

В публикации [13] получил развитие метод стабилизационных диаграмм для решения задачи экспериментального модального анализа и идентификации параметров модели. Принята гипотеза Фурье. Решение проблемы сведено к рассмотрению АЧХ одного датчика.

В статье [14] предложен вероятностный подход с целью уточнения параметров динамической модели (фермы) по результатам ее экспериментального модального анализа. Для решения краевой задачи по теории колебаний использован метод разделения переменных. Принята гипотеза Фурье. Решение проблемы сведено к рассмотрению АЧХ одного датчика.

В работе [15] исследована возможность отбрасывания (усечения) верхних гармоник при моделировании нагрузки и отклика в задаче экспериментального модального анализа. Принята гипотеза Фурье. Проблема решена путем анализа АЧХ одного датчика.

В статье [16] рассмотрена задача экспериментального модального анализа печатной платы с установленными на ней малоразмерными электронными устройствами и микрочипами. Для решения краевой задачи по теории колебаний использован метод разделения переменных. Принята гипотеза Фурье. Решение проблемы сведено к анализу АЧХ одного датчика.

В работе [17] введены понятия сложности тона и модальной фазовой параллельности для минимизации отклонений от гипотезы Фурье в задаче экспериментального модального анализа.

Анализ результатов указанных работ показал, что использование гипотезы Фурье требует дополнительного обоснования.

Цель работы — не решение задачи экспериментального модального анализа, а исследование физических свойств резонанса. В качестве испытываемой модели выбрана коробчатая оболочка (КО). Модальный анализ КО показал, что в резонансе (одного и того же тона колебаний) разные точки изделия колеблются с различными частотами. Выявленные частотные сдвиги составляют около 2 Гц.

Проблема частотного сдвига очень актуальна, так как частотный спектр современного летательного аппарата очень плотный: на 1 Гц приходится до 100 тонов колебаний. В этих условиях эффект частотного сдвига может сделать невозможной идентификацию расчетной модели летательного аппарата по результатам его частотных испытаний.

### Оборудование эксперимента и его оснастка.

Экспериментальные исследования КО выполнены в лаборатории динамических испытаний кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для проведения частотных испытаний использовано следующее оборудование:

- переносной восьмиканальный вибростенд малой мощности GW-V55/PA300E производства Data Physics Corporation (США), развивающий максимальное усилие 310 Н и оснащенный программным обеспечением Vector 2;
- три одноосных датчика ускорений (далее датчики) Kistler 8742A5 Piezotron Accelerometer (Швейцария) — контрольный, базовый и рабочий — с диапазоном измерения  $\pm 500g$  и коэффициентом усиления около 10 мВ/г [18, 19].

### Описание объекта и методики исследования.

Выбранная в качестве объекта исследования КО имела четыре стенки: верхнюю, нижнюю, левую и правую (рис. 1). На каждую стенку наносили сетку, состоящую из 66 узлов. Четыре стенки содержали 264 узла. Испытуемую КО закрепляли на монтажной плите вибростенда болтовым соединением через втулку (рис. 2, а).

На КО устанавливали три датчика: контрольный, базовый и рабочий. Первый из них контролировал работу оборудования. Его закрепляли на нижней стенке КО рядом с болтом с помощью белого пластилина (рис. 2, б). Положение базового датчика (рис. 2, в) фиксировали резьбовым соединением на верхней стенке КО в окрестности передней кромки.

Рабочий датчик (рис. 2, г) перемещали по узлам, связывая с КО фиолетовым пластилином. Масса датчика с пластилином составляла 0,008 кг. Рассматривали частотный диапазон 10...50 Гц.

Из частотного спектра КО выбирали тон колебаний, для которого в каждом из узлов сетки строили АЧХ базового и рабочего датчиков. Определяли частотный сдвиг — расстояние между пиками АЧХ базового и рабочего датчи-

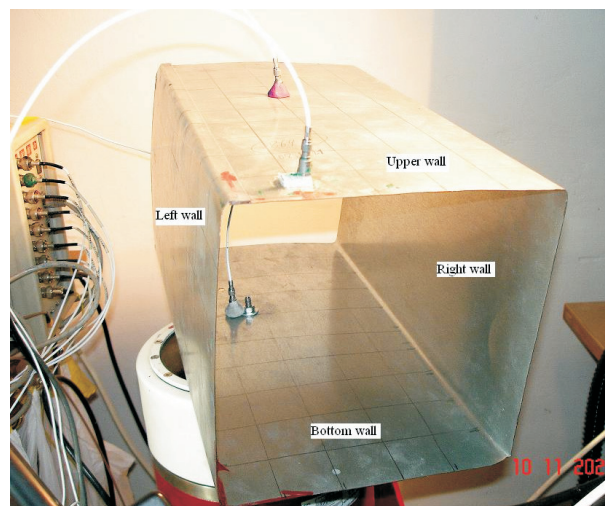


Рис. 1. Внешний вид испытуемой КО с тремя датчиками, закрепленной на монтажной плите вибростенда

ков, соответствующими одному и тому же тону колебаний. Для каждой стенки по узлам строили поверхность частотных сдвигов.

Выбор тона колебаний (40,37 Гц) из частотного спектра КО проиллюстрирован на рис. 3, а. Соседние с ним тона имеют резкие резонансы, и их АЧХ сильно зашумлены. Здесь и далее черная АЧХ соответствует контрольному датчику, зеленая — базовому, фиолетовая — рабочему.

Зашумленность измерительного сигнала обусловлена «прощелкиванием» несовершенных плоских стенок КО при вибрациях. Расчетная форма вынужденных колебаний КО на вибростенде показана на рис. 3, б.

**Особенности эксперимента.** Испытуемая КО, выполненная из стали, имела следующие параметры: габаритные размеры — 0,2×0,2×0,4 м (см. рис. 1); масса — 0,764 кг; толщина стенки — 0,5 мм.

Монтажную плиту вибростенда нагружали моногармонически (sine test). Амплитуда ее смещений была постоянной и составляла 0,2 мм. Для модального анализа рассматриваемого тона колебаний частоту нагружения сканировали в интервале 40,0...43,0 Гц.

Зависимость измеренного частотного сдвига от отрицательного логарифма скорости сканирования частоты возбуждения вибростенда  $\lg(dp/dt)$  показана на рис. 4. Характерная «полка» кривой свидетельствует о сходимости частотного сдвига по данному параметру. Скорость сканирования частоты возбуждения  $dp/dt$

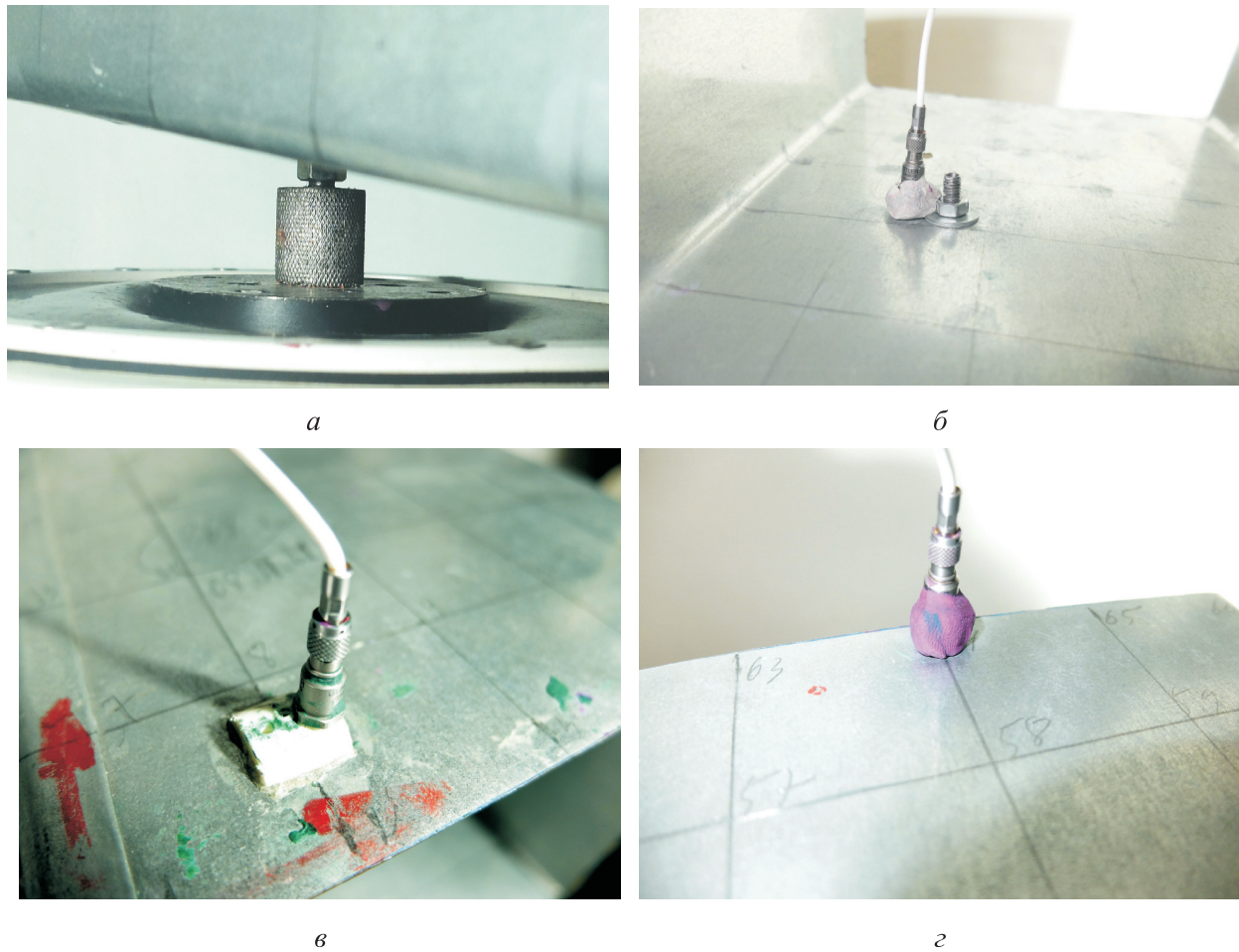


Рис. 2. Схемы соединения КО с монтажной плитой вибростенда (а) и закрепления на КО контрольного (б), базового (в) и рабочего (з) датчиков

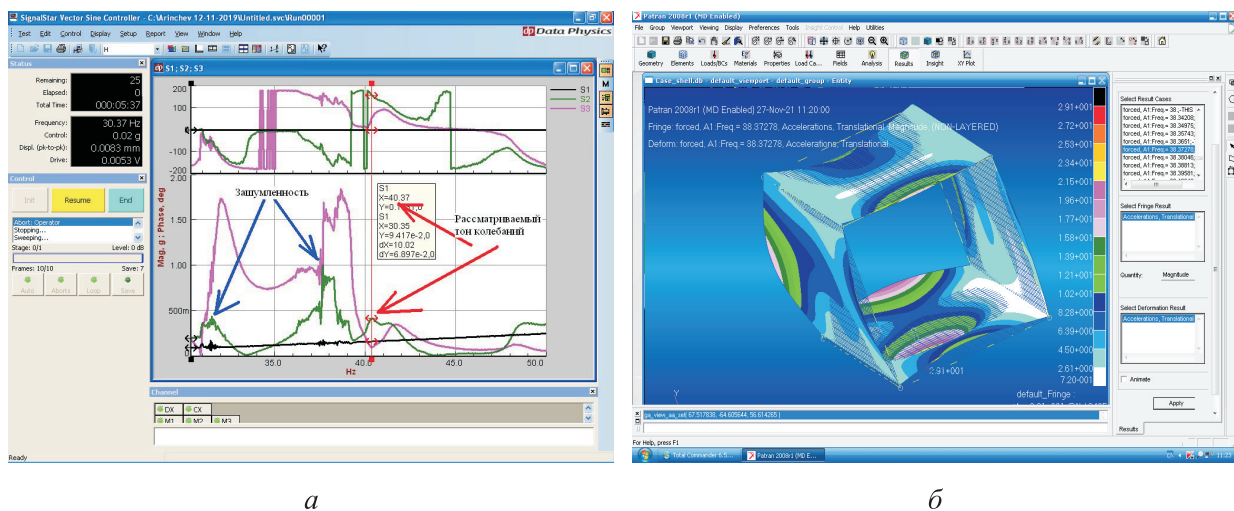


Рис. 3. Частотный спектр КО (а) и расчетная форма ее вынужденных колебаний на вибростенде (б) в резонанс тона колебаний 40,37 Гц

во всех экспериментах принята равной 0,03 Гц/с.

В каждом из 264 узлов строили три АЧХ. Если фиолетовая АЧХ (рис. 5) расположена ниже

черной, то рабочий датчик находится в так называемой узловой зоне. Если фиолетовая АЧХ имеет пик, то узловая зона называется технической (рис. 5, а).



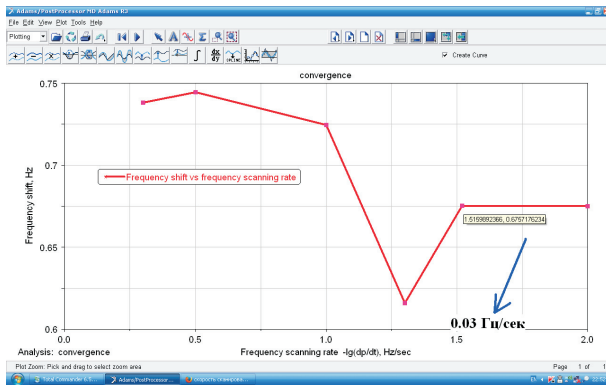


Рис. 4. Зависимость измеренного частотного сдвига от отрицательного логарифма скорости сканирования частоты возбуждения вибростенда  $\lg(dp/dt)$

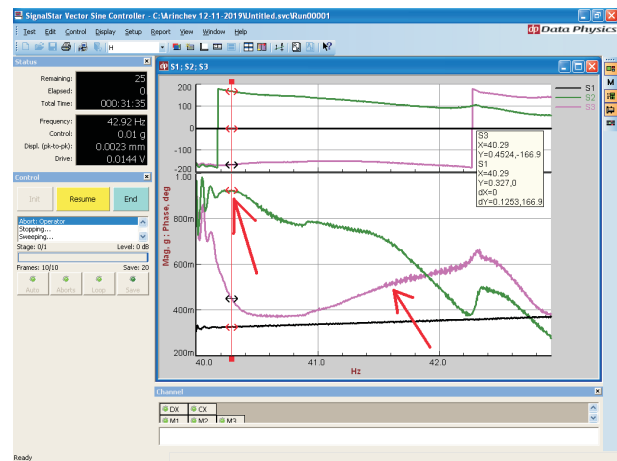
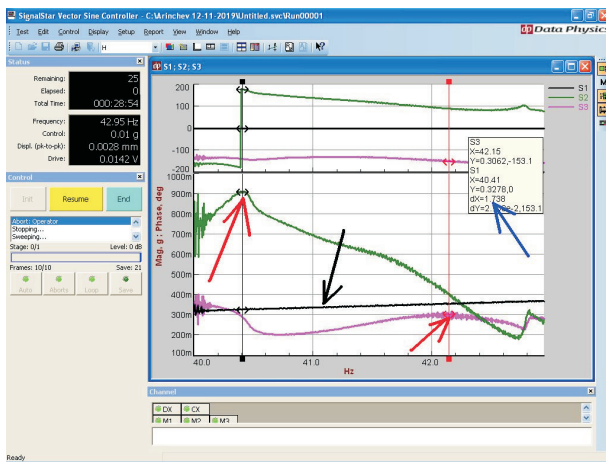
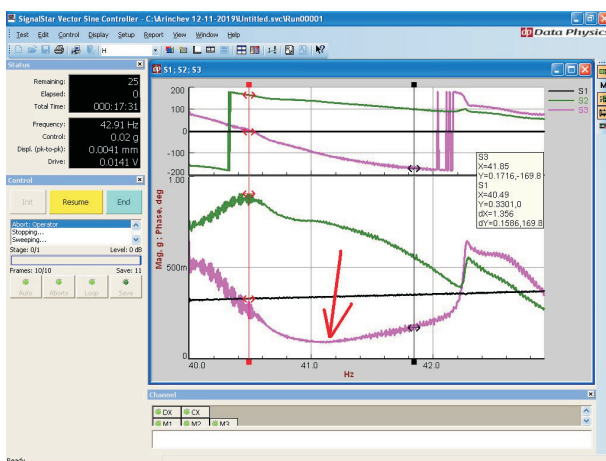


Рис. 6. Результаты частотных испытаний КО при «исчезновении» тона колебаний



*a*



*б*

Рис. 5. Результаты частотных испытаний КО в технической (а) и абсолютной (б) узловых зонах

Так, на рис. 5, *a* частотный сдвиг в технической узловой зоне равен 1,738 Гц. Если пик АЧХ рабочего датчика в узловой зоне отсутствует, то она называется абсолютной

(рис. 5, *б*). Частотный сдвиг принят равным нулю.

Отметим, что пик АЧХ рабочего датчика может отсутствовать, даже если он находится не в узловой зоне (рис. 6), т. е. происходит «исчезновение» тона колебаний. В этом случае частотный сдвиг также равен нулю.

**Отклонения от гипотезы Фурье.** По измеренным значениям частотных сдвигов для каждой стенки КО построена поверхность в пакете Surfer с помощью интерполяционной kriging-процедуры, позволяющей строить поверхности без сглаживания.

Результаты частотных испытаний показали, что на верхней и нижней стенках КО частотный сдвиг нарастает при смещении рабочего датчика от передней кромки к задней (рис. 7, *a* и *б*). Частотный сдвиг на верхней стенке КО (см. рис. 7, *a*) изменяется в диапазоне 0...1,05 Гц, на нижней — в интервале -0,3...1,3 Гц (см. рис. 7, *б*).

На левой и правой стенках КО (рис. 7, *в*, *г*) частотный сдвиг достигает 2,1 Гц. На этих стенках имеются зоны с нулевым сдвигом, где выполняется гипотеза Фурье. Так, рис. 8 взят из зоны Фурье на правой стенке КО.

Теоретическое обоснование отклонений от гипотезы Фурье на основе метода частиц приведено в работе [20]. С каждой частицей ассоциирована отдельная модель рассматриваемой динамической системы. Ассоциированные модели содержат неньютоновские упругие элементы. Результирующая модель есть совокупность всех моделей, ассоциированных с частицами.

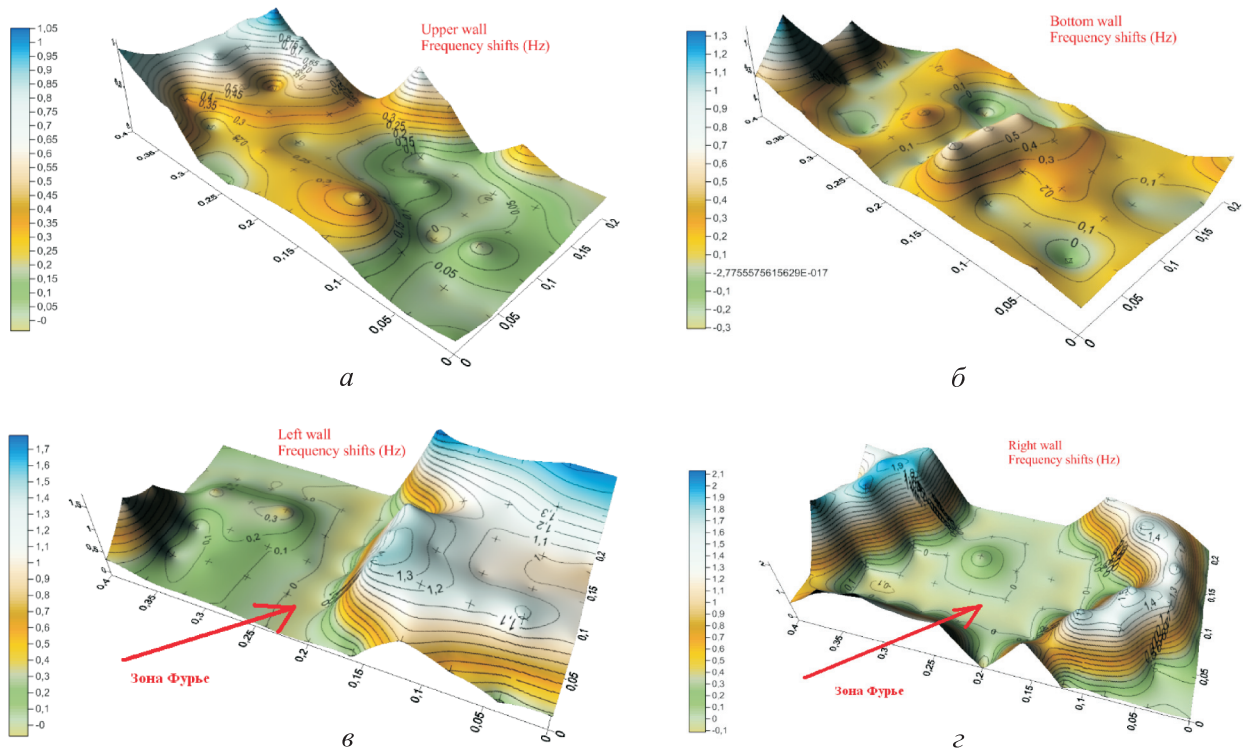


Рис. 7. Результаты частотных испытаний верхней (а), нижней (б), левой (в) и правой (г) стенок КО

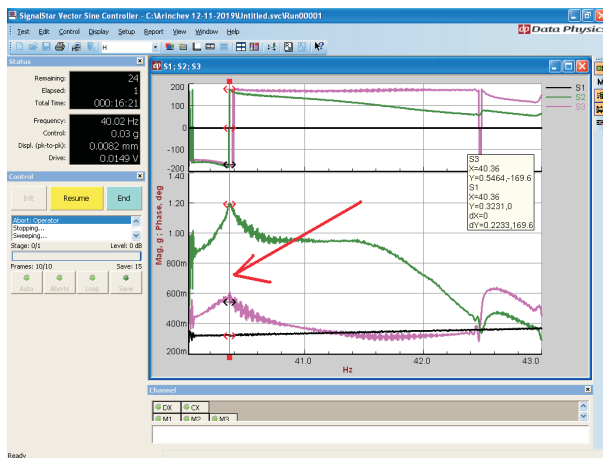


Рис. 8. АЧХ правой стенки КО в соответствии с гипотезой Фурье

### Выводы

1. На практике для решения краевых задач экспериментального модального анализа летательных аппаратов традиционно используют гипотезу Фурье. Отклонения от гипотезы Фурье в промышленных экспериментах считают погрешностью и минимизируют.

2. Показано, что при низкочастотных испытаниях КО частотные сдвиги (отклонения от гипотезы Фурье) достигают 2,1 Гц. Выявлено наличие зон Фурье на боковых стенках изделия.

### Литература

[1] Mains M., Dilworth B.J. *Topics in modal analysis & testing*. Vol. 9. Springer, 2018. 384 p.

[2] Harvie J.M., Baqersad J. *Shock & vibration, aircraft/aerospace, energy harvesting, acoustic & optics*. Vol. 9. Springer, 2017. 330 p.

[3] Boeswald M., Göge D., Füllekrug U. et al. A review of experimental modal analysis methods with respect to their applicability to test data of large aircraft structures. *Proc. ISMA*, 2006, pp. 2461–2482.

[4] Donaldson I.A. *Experimental modal analysis of business jet fuselage tail section sub-assemblies*. Thes. deg. mast. appl. sci. Queen’s University, 2020. 141 p.

- [5] Kannan S., Ramamoorthy M. Mechanical characterization and experimental modal analysis of 3D-printed ABS, PC and PC-ABS materials. *Mater. Res. Express*, 2020, vol. 7, no. 1, art. 015341, doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6a48>
- [6] Karaagacli T., Ozguven H.N. Experimental modal analysis of nonlinear systems by using response-controlled stepped sine testing. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2021, vol. 146, art. 107023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107023>
- [7] Lee J., Kim D.H. Experimental modal analysis and vibration monitoring of the cutting-tool support structure. *Int. J. Mech. Sci.*, 1995, vol. 37, no. 11, pp. 1133–1146, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(95\)00029-W](https://doi.org/10.1016/0020-7403(95)00029-W)
- [8] Nikhamkin M., Semenov S., Silberschmidt V.V. et al. Identification of elastic parameters of laminated carbon fiber plates using experimental modal analysis. *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, vol. 14, no. 12, pp. 2279–2285.
- [9] Ozdoganlar O.B., Hansche B.D., Carne T.G. Experimental modal analysis for Microsystems. *Proc. IMAC-XXI Conf. & Exposition on Structural Dynamic*, 2003. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.122.5562&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 15.12.2021).
- [10] Ozdoganlar O.B., Hansche B.D., Carne T.G. Experimental modal analysis for microelectromechanical systems. *Exp. Mech.*, 2005, vol. 45, no. 6, pp. 498–506, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02427903>
- [11] Rappalardo C.M., Guida D. System identification and experimental modal analysis of a frame structure. *Eng. Lett.*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 56–68.
- [12] Ramsey K.A. Experimental modal analysis, structural modifications and fem analysis on a desktop computer. *Sound Vib.*, 1983, vol. 17, no. 2, pp. 19–27.
- [13] Bart P., De Roeck G. Stochastic system identification for operational modal analysis: a review. *J. Dyn. Sys., Meas., Control.*, 2001, vol. 123, no. 4, pp. 659–657, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1410370>
- [14] Soize C., Capiez-Lernout E., Ohayon R. Robust updating of uncertain computational models using experimental modal analysis. *AAIA J.*, 2008, vol. 46, no. 11, pp. 2955–2965, doi: <https://doi.org/10.2514/1.38115>
- [15] Tarpo M., Vigso M., Brincker R. Modal truncation in experimental modal analysis. In: *Topics in modal analysis and testing*. Vol. 9. Springer, 2018, pp. 143–152.
- [16] Wong T.L., Stevens K.K., Wang G. Experimental modal analysis and dynamic response prediction on PC boards with surface-mount electronic components. *J. Electron. Packag. S.*, 1991, vol. 113, no. 3, pp. 244–249, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2905402>
- [17] Хейлен В., Ламменс С., Сас П. *Модальный анализ. Теория и испытания*. Москва, Новатест, 2010. 319 с.
- [18] dataphysics.com: *веб-сайт корпорации DataPhysics*. URL: <https://www.dataphysics.com/> (дата обращения: 15.12.2021).
- [19] blms.ru: *веб-сайт БЛМ Синержи*. URL: <https://blms.ru/> (дата обращения: 15.12.2021).
- [20] Аринчев С.В. Третий закон Ньютона — это не догма. Это расчетная гипотеза. *Известия высших учебных заведений, Машиностроение*, 2020, № 6, с. 36–50, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-6-36-50>

## References

- [1] Mains M., Dilworth B.J. *Topics in modal analysis & testing*. Vol. 9. Springer, 2018. 384 p.
- [2] Harvie J.M., Baqersad J. *Shock & vibration, aircraft/aerospace, energy harvesting, acoustic & optics*. Vol. 9. Springer, 2017. 330 p.
- [3] Boeswald M., Göge D., Füllekrug U. et al. A review of experimental modal analysis methods with respect to their applicability to test data of large aircraft structures. *Proc. ISMA*, 2006, pp. 2461–2482.
- [4] Donaldson I.A. *Experimental modal analysis of business jet fuselage tail section sub-assemblies*. Thes. deg. mast. appl. sci. Queen's University, 2020. 141 p.

- [5] Kannan S., Ramamoorthy M. Mechanical characterization and experimental modal analysis of 3D-printed ABS, PC and PC-ABS materials. *Mater. Res. Express*, 2020, vol. 7, no. 1, art. 015341, doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6a48>
- [6] Karaagacli T., Ozguven H.N. Experimental modal analysis of nonlinear systems by using response-controlled stepped sine testing. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2021, vol. 146, art. 107023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107023>
- [7] Lee J., Kim D.H. Experimental modal analysis and vibration monitoring of the cutting-tool support structure. *Int. J. Mech. Sci.*, 1995, vol. 37, no. 11, pp. 1133–1146, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(95\)00029-W](https://doi.org/10.1016/0020-7403(95)00029-W)
- [8] Nikhamkin M., Semenov S., Silberschmidt V.V. et al. Identification of elastic parameters of laminated carbon fiber plates using experimental modal analysis. *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, vol. 14, no. 12, pp. 2279–2285.
- [9] Ozdoganlar O.B., Hansche B.D., Carne T.G. Experimental modal analysis for Microsystems. *Proc. IMAC-XXI Conf. & Exposition on Structural Dynamic*, 2003. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.122.5562&rep=rep1&type=pdf> (accessed: 15.12.2021).
- [10] Ozdoganlar O.B., Hansche B.D., Carne T.G. Experimental modal analysis for microelectromechanical systems. *Exp. Mech.*, 2005, vol. 45, no. 6, pp. 498–506, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02427903>
- [11] Pappalardo C.M., Guida D. System identification and experimental modal analysis of a frame structure. *Eng. Lett.*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 56–68.
- [12] Ramsey K.A. Experimental modal analysis, structural modifications and fem analysis on a desktop computer. *Sound Vib.*, 1983, vol. 17, no. 2, pp. 19–27.
- [13] Bart P., De Roeck G. Stochastic system identification for operational modal analysis: a review. *J. Dyn. Sys., Meas., Control.*, 2001, vol. 123, no. 4, pp. 659–657, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1410370>
- [14] Soize C., Capiez-Lernout E., Ohayon R. Robust updating of uncertain computational models using experimental modal analysis. *AAIA J.*, 2008, vol. 46, no. 11, pp. 2955–2965, doi: <https://doi.org/10.2514/1.38115>
- [15] Tarpo M., Vigso M., Brincker R. Modal truncation in experimental modal analysis. In: *Topics in modal analysis and testing*. Vol. 9. Springer, 2018, pp. 143–152.
- [16] Wong T.L., Stevens K.K., Wang G. Experimental modal analysis and dynamic response prediction on PC boards with surface-mount electronic components. *J. Electron. Packag. S.*, 1991, vol. 113, no. 3, pp. 244–249, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2905402>
- [17] Heylen W., Lammens S., Sas P. *Modal analysis theory and testing*. Katholieke Universiteit Leuven, 1998. 170 p. (Russ. ed.: *Modal'nyy analiz. Teoriya i ispytaniya*. Moscow, Novatest Publ., 2010. 319 p.)
- [18] dataphysics.com: *website of DataPhysics corporation*. URL: <https://www.dataphysics.com/> (accessed: 15.12.2021).
- [19] blms.ru: *website of BLM Sinerzhi*. URL: <https://blms.ru/> (accessed: 15.12.2021). (In Russ.).
- [20] Arinchev S.V. Newton's third law is not a dogma but a computational hypothesis. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy, Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 6, pp. 36–50. doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-6-36-50> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 24.01.2022



## Информация об авторе

**АРИНЧЕВ Сергей Васильевич** — доктор технических наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

## Information about the author

**ARINCHEV Sergey Vasilyevich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

### Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Аринчев С.В. Отклонения от гипотезы Фурье, выявленные при низкочастотных испытаниях коробчатой оболочки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 6, с. 60–68, doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-60-68

### Please cite this article in English as:

Arinchev S.V. Deviations from the Fourier Hypothesis, Detected during the Low Frequency Modal Analysis of the Box-Shell. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 6, pp. 60–68, doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-60-68



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
предлагает читателям монографию**

### **«Строительная механика композитных конструкций ракетно-космической техники. Курс лекций»**

**Авторы: Ан.А. Смердов, Ал.А. Смердов**

Приведены основные положения теории оптимального проектирования конструкций, рассмотрены методы проектных расчетов композитных материалов и простейших элементов конструкций, а также несущих композитных оболочек различных конструктивных схем и размеростабильных композитных космических конструкций. Представлены алгоритмы расчета типовых композитных элементов конструкций, которые могут быть самостоятельно использованы студентами при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Для студентов старших курсов, обучающихся по специальности 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракетно-космических комплексов» Материал отдельных лекций может быть также использован при изучении смежных дисциплин, таких как «Проектные расчеты композитных конструкций ракетно-космической техники», «Строительная механика ракет» и «Строительная механика космических аппаратов».

### **По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>