

УДК 629.784

doi: 10.18698/0536-1044-2022-11-92-99

Восьмиканальные частотные испытания цилиндрической оболочки со шпангоутом в диапазоне 1000...8000 Гц

С.В. Аринчев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Eight-channel Frequency-Response Test of the Cylindrical-shell-and-ring Assembly in the Range 1000 to 8000 Hz

S.V. Arinchev

Bauman Moscow State Technical University

Чтобы повысить коэффициент полезного действия ракетного двигателя, необходимо увеличить давление в камере сгорания. Но чем выше давление в камере сгорания, тем труднее подать туда топливо через форсунки с помощью турбонасосного агрегата. Скорость вращения современного турбонасосного агрегата, его масса и габаритные размеры становятся запредельными. Поэтому двигателисты предлагают отказаться от традиционного спокойного (дефлаграционного) горения топлива, заменив его детонационным (горением со взрывами). Наибольшие перспективы в ракетно-космической технике имеет двигатель с непрерывно-детонационным горением топлива, который нагружает опору в частотном диапазоне 1000...10 000 Гц. Такое высокочастотное нагружение сопровождается так называемым эффектом Оже, когда модуль упругости материала тонкостенной конструкции уменьшается в 10 раз. Природа высокочастотного нагружения тонкостенных конструкций изучена недостаточно. Приведены результаты экспериментального анализа высокочастотного нагружения цилиндрической оболочки со шпангоутом в частотном диапазоне 1000...8000 Гц. Традиционно для решения краевой задачи высокочастотного нагружения элементов летательного аппарата используют гипотезу о возможности разделения переменных по Фурье. Согласно этой гипотезе, в резонансе заданного тона все точки изделия колеблются с одной и той же частотой. Проведено экспериментальное исследование отклонения от гипотезы Фурье при высокочастотном нагружении. Выявленные частотные сдвиги составили около 40 Гц, что соизмеримо с расстоянием (по частоте) между соседними тонами колебаний.

Ключевые слова: детонационный двигатель, эффект Оже, гипотеза Фурье

In order to increase the efficiency of a rocket jet propulsion, it is necessary to increase the pressure in the combustion chamber. However, the higher the pressure is in the combustion chamber, the more difficult it is to supply fuel in it through the nozzles using a turbopump unit. The rotation speed of a modern turbopump unit, its mass and overall dimensions become prohibitive. Therefore, engine engineers have the proposal to abandon the traditional calm (deflagration) combustion of fuel, and to replace it with with detonation (combustion with explosions). The jet propulsion with continuous detonation combustion of fuel, which loads the support in the frequency range of 1000...10000 Hz, has the promising outlook in rocket and space technology. Such high-frequency loading is ac-

accompanied by the so-called Auger effect, when the modulus of elasticity of the material of a thin-walled structure decreases by 10 times. The nature of high-frequency loading of thin-walled structures has not been studied sufficiently. The results of experimental analysis of high-frequency loading of a cylindrical-shell-and-ring assembly in the frequency range 1000...8000 Hz are represented. It is common way to use the hypothesis of the possibility of Fourier separation of variables in order to solve the boundary value problem of high-frequency loading of aircraft elements. The detected frequency shifts were 40 Hz approximately. It is commensurate with the distance (in frequency) between adjacent vibration tones.

Keywords: detonation jet propulsion, Auger effect, Fourier hypothesis

Давление в камере сгорания современного ракетного двигателя очень велико. Требования к турбонасосному агрегату становятся предельными. Скорость вращения современного турбонасосного агрегата такова, что даже малые погрешности металлообработки поверхности крыльчатки насоса дают недопустимый дисбаланс.

Особенности анализа динамики современной роторной машины в условиях высокочастотного нагружения рассмотрены в работе [1]. Для решения указанной проблемы двигателисты предлагают отказаться от традиционного спокойного (дефлаграционного) горения топлива. Предлагается использовать детонационное горение (горение со взрывами).

Детонационные двигатели бывают дискретными (пульсационными) и с непрерывно-детонационным горением топлива. Детонация непрерывна, если фронт ее волны движется по окружности (со скоростью детонации) в пределах узкой (несколько миллиметров) кольцевой камеры сгорания.

В работе [2] показано, что у специального демонстрационного детонационного двигателя удельный импульс тяги практически такой же, как и у дефлаграционного аналога, а давление в камере сгорания в 2 раза меньше.

Существует большое количество публикаций по устройству детонационного двигателя. Однако работ по динамике элементов конструкции, на которые этот двигатель установлен, — недостаточно. Детонационный двигатель действует на опору с частотой 1000...10 000 Гц. Кроме осевой силы тяги возникает паразитный детонационный момент. Результаты спектрального анализа давления в кольцевой камере сгорания приведены в работах [3, 4].

Цель работы — экспериментальное исследование высокочастотного нагружения цилиндрической оболочки со шпангоутом (далее ЦОШ) в частотном диапазоне 1000...8000 Гц.

Оборудование эксперимента и его оснастка.

Экспериментальные исследования выполняли в лаборатории динамических испытаний кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для проведения эксперимента использовали следующее оборудование:

- переносной восьмиканальный вибростенд (рис. 1) малой мощности GW-V55/PA300E (заводской номер 09/A6Q/26070) производства Data Physics Corporation (США), развивающий максимальное усилие 310 Н и оснащенный программным обеспечением Vector 2; максимально допустимая частота нагружения составляла 8000 Гц; рассматриваемый частотный диапазон $f = 1000...8000$ Гц;

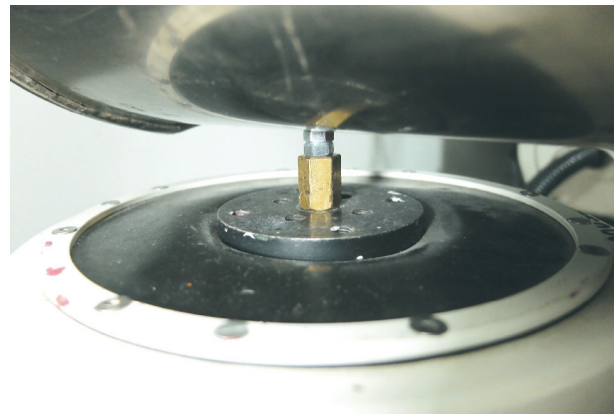
- одноосные датчики ускорения (далее датчики) Kistler 8742A5 производства Kistler Instrument Corporation (Швейцария) с диапазоном измерения ускорения $\pm 500g$ и коэффициентом усиления около 10 мВ/г [5, 6] — один управляющий и семь измерительных; датчики устанавливали на резьбу (рис. 2, а) и вкручивали не в металлическую стенку ЦОШ, а в подложку из оргстекла; масса одного датчика составляла 0,004 кг.



Рис. 1. Внешний вид вибростенда GW-V55/PA300E с закрепленной на его монтажной плите ЦОШ



а



б

Рис. 2. Схемы установки датчика на резьбу (а) и закрепления ЦОШ на монтажной плите вибростенда болтовым соединением посредством втулки (б)

Экспериментальное исследование высокочастотного нагружения ЦОШ проводили путем одноточечного кинематического нагружения. Испытуемую ЦОШ закрепляли на монтажной плите вибростенда болтовым соединением посредством втулки (рис. 2, б).

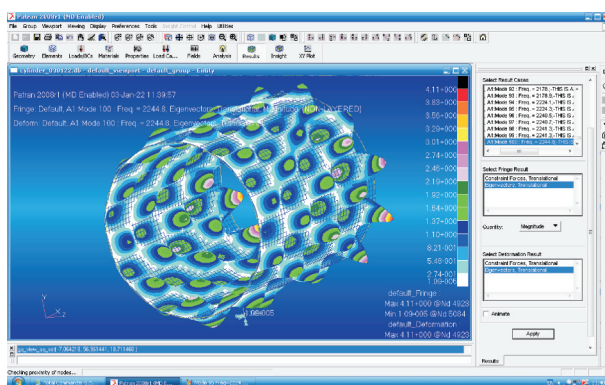
Материал цилиндрической оболочки и шпангоута — сталь. Масса ЦОШ — 0,940 кг. Диаметр цилиндра составлял 0,228 м, длина — 0,280 м, толщина стенки — 0,6 мм. Шпангоут, выполненный в форме трубы, представлял собой отбортовку цилиндра. Наружный радиус шпангоута — 2 мм, внутренний радиус — 1,4 мм.

Предварительное исследование. Расчетные формы собственных колебаний ЦОШ на частоте $f = 2244$ и 7981 Гц показаны на рис. 3, а и б. Эти формы получены методом конечных элементов в пакете MSC Nastran. Они носят иллю-

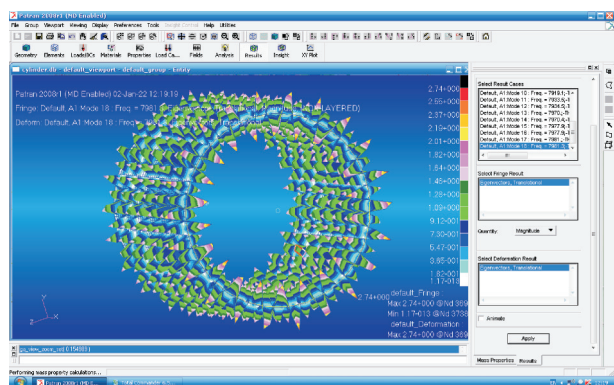
стративный характер, и в эксперименте их не рассматривали. Высокочастотные формы колебаний имеют высокую степень изменяемости. Их можно исследовать специальным лазерным сканером высокого разрешения [7, 8].

Результаты оценки степени опасности создаваемых в эксперименте высокочастотных вибраций ЦОШ приведены на рис. 4. Здесь показаны (нижняя группа кривых разного цвета) амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) испытуемой ЦОШ в частотных диапазонах $f = 900 \dots 1000$ Гц (рис. 4, а) и $f = 7900 \dots 8000$ Гц (рис. 4, б), снятые восемью датчиками в точках, произвольным образом расположенных на поверхности ЦОШ.

Черная стрелка указывает постоянное и равное $5g$ ускорение управляющего датчика. Ускорение управляющего датчика равно таковому для монтажной плиты вибростенда. Это — внешнее кинематическое нагружение.

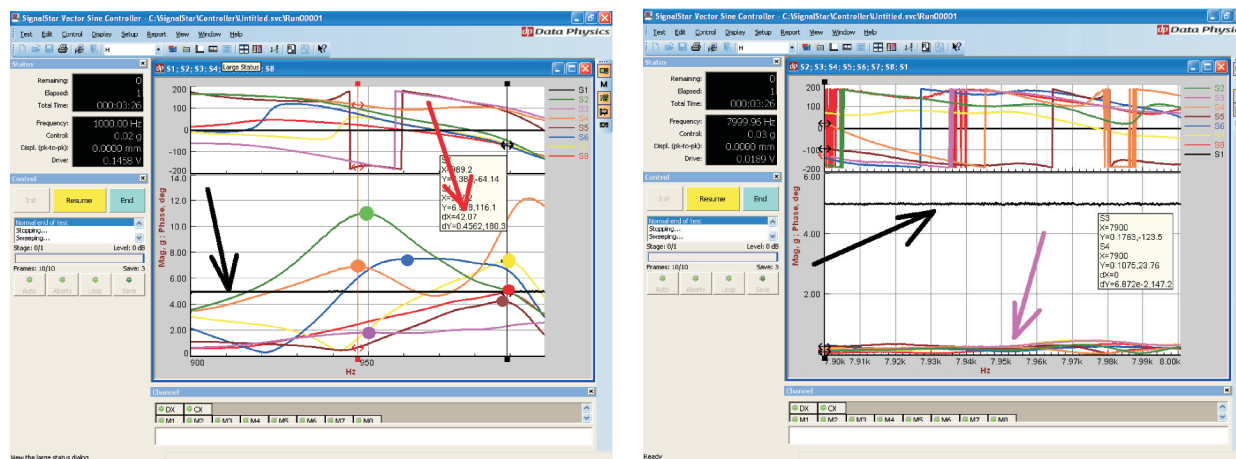


а



б

Рис. 3. Расчетные формы собственных колебаний ЦОШ на частоте $f = 2244$ (а) и 7981 Гц (б)



а

б

Рис. 4. АЧХ испытуемой ЦОШ в частотных диапазонах $f = 900 \dots 1000$ Гц (а) и $f = 7900 \dots 8000$ Гц (б) при произвольном расположении датчиков на поверхности оболочки

Как видно из рис. 4, а, на частоте $f \approx 1000$ Гц внешняя нагрузка ЦОШ и ее частотный отклик соизмеримы. Пики семи рассматриваемых АЧХ, отмеченных кружками, не лежат на одной вертикальной прямой. Для этого варианта измерений частотный сдвиг (указанный красной стрелкой) составил 42,07 Гц. Частотный сдвиг — расстояние (по частоте) между крайним левым и крайним правым пиками АЧХ, соответствующими рассматриваемому тону колебаний.

АЧХ испытуемой ЦОШ в частотном диапазоне $f = 7900 \dots 8000$ Гц приведены на рис. 4, б. Видно, что кривые задемпфированы, пики сглажены. Картина соответствует выводам, сделанным в работе [8]. Ускорения измерительных датчиков в 10 раз ниже, чем у управляющего.

Казалось бы, что такое нагружение не представляет опасности для рассматриваемой упругой конструкции. Вместе с тем в работах [9, 10] показано, что в частотном диапазоне $f = 1000 \dots 10\,000$ Гц модуль упругости материала тонкостенных конструкций уменьшается в 10 раз (эффект Оже). Эффект Оже может оказаться определяющим при нахождении несущей способности опоры детонационного двигателя.

Для понимания этого эффекта требуется детальное изучение природы высокочастотного резонанса. В частности, при анализе высокочастотного нагружения тонкостенных упругих конструкций необходимо исследовать отклонение от гипотезы Фурье, согласно которой пики АЧХ датчиков, установленных в разных точках

изделия, должны лежать на одной вертикальной прямой.

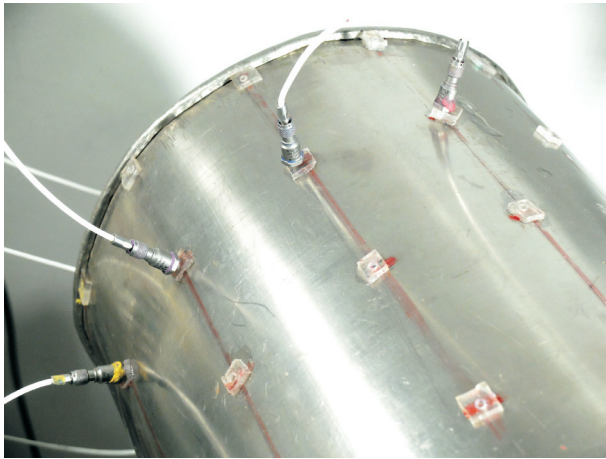
Результаты эксперимента. Краевые задачи динамики тонкостенных конструкций в частотном диапазоне до 10 000 Гц традиционно решают методом разделения переменных.

Так, в работе [11] этот метод использован для асимптотического анализа высокочастотного нагружения тонкостенных конструкций летательных аппаратов в частотном диапазоне до 10 000 Гц, в статье [12] — для модального анализа «дребезга» резцедержателя токарного станка, в публикации [13] — для постановки и решения обратной задачи модального анализа.

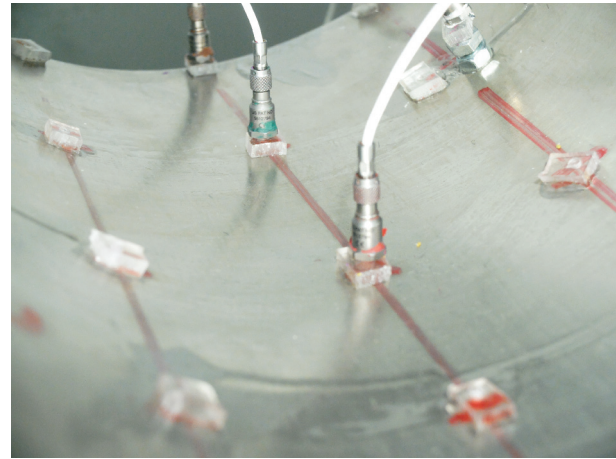
В работе [14] метод разделения переменных применен в частотном диапазоне до 3000 Гц для идентификации элементов матрицы демпфирования балочной конструкции с удержанием пятнадцати тонов колебаний.

Очевидно, что если исследователь разделяет переменные, то он автоматически принимает расчетную гипотезу (гипотезу Фурье), что в резонансе по данному тону колебаний все точки изделия колеблются с одной и той же частотой.

В экспериментальных исследованиях ЦОШ принятие этой гипотезы означает, что пики АЧХ (рассматриваемого тона колебаний), полученных со всех измерительных датчиков, должны располагаться на одной вертикальной прямой. Частота последней должна соответствовать данному тону колебаний. Эксперимент показал наличие существенных отклонений от гипотезы Фурье.



а



б

Рис. 5. Схемы расположения четырех датчиков в четвертой строке (а) и трех датчиков в третьем столбце (б)

В предварительном исследовании датчики размещали произвольным образом на поверхности ЦОШ. В эксперименте датчики расставляли по так называемым строкам и столбцам.

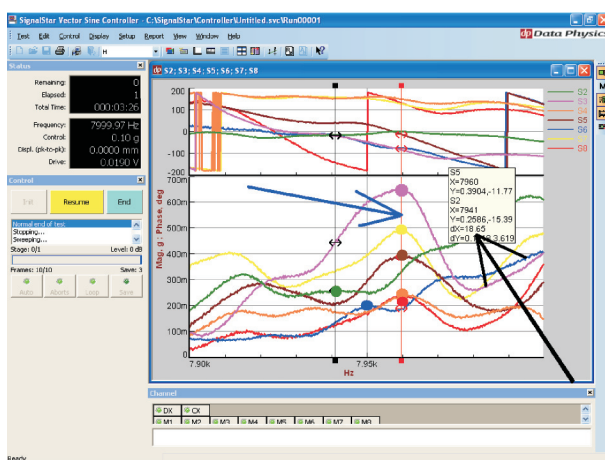
Из семи измерительных датчиков четыре располагали в строку на наружной верхней поверхности ЦОШ (рис. 5, а), три — в столбец на внутренней поверхности ЦОШ (рис. 5, б). Всего было пять строк, пронумерованных от передней кромки к шпангоуту, и семь столбцов, нумерацию которых проводили против хода часовой стрелки. Общее число вариантов составляло $5 \times 7 = 35$.

Как видно из рис. 6, а, в точке № 25 (вторая строка, пятый столбец) пять из семи пиков АЧХ разных датчиков находятся на одной вертикали. Здесь гипотеза Фурье выполняется ча-

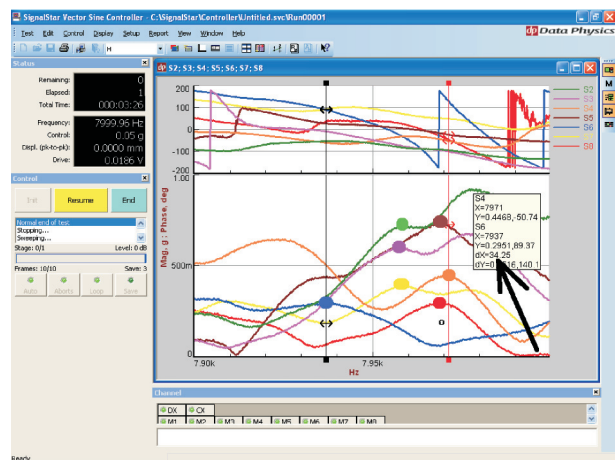
стично, частотный сдвиг равен 18,65 Гц, но это нетипичный случай.

Типичный случай с частотным сдвигом, составляющим 34,25 Гц, показан на рис. 6, б. Видно, что этот сдвиг соизмерим с расстоянием (по частоте) между соседними тонами колебаний. По этой причине в ряде случаев возникает неопределенность в части принадлежности пика АЧХ. В этих случаях его можно отнести как к рассматриваемому тону колебаний, так и к соседнему.

По измеренным частотным сдвигам в пакете Surfer построена поверхность, показанная на рис. 7. По осям координат отложены номера строк и столбцов матрицы датчиков. Поверхность сглажена. Видно, что частотные сдвиги велики, отклонения от гипотезы Фурье суще-



а



б

Рис. 6. АЧХ испытуемой ЦОШ в точке № 25 с нетипичным (а) и типичным (б) расположением пиков

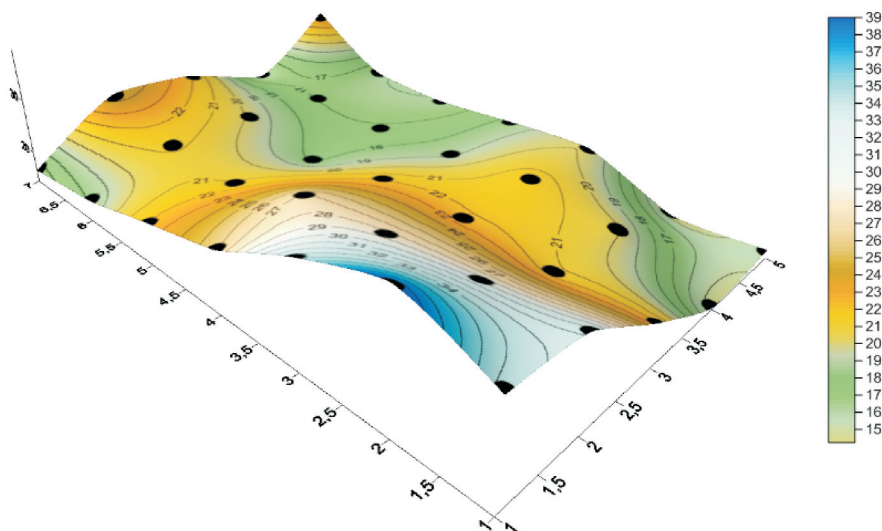


Рис. 7. Результаты частотных испытаний ЦОШ в разных точках, полученные в пакете Surfer

ственные. Теоретическое обоснование отклонений от гипотезы Фурье дано в работе [15].

Выводы

1. Детонационный двигатель с непрерывно-детонационным горением топлива действует на опору с частотой 1000...10 000 Гц. Природа высокочастотного резонанса в этом частот-

ном диапазоне требует дополнительного изучения.

2. При высокочастотных испытаниях ЦОШ в частотном диапазоне 1000...8000 Гц выявлены существенные отклонения от гипотезы Фурье. Частотные сдвиги составили около 40 Гц, что соизмеримо с расстоянием (по частоте) между соседними тонами колебаний.

Литература

- [1] Rosso C., Bonisoli E., Bruzzone F. On the veering-phenomenon potential in high-speed gears design. In: *Topics in modal analysis & testing*, Springer, vol. 9, 2018, pp. 135–142, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-74700-2_14
- [2] Фролов С.М., Аксенов В.С., Иванов В.С. и др. Ракетный двигатель с непрерывно-детонационным горением топливной пары «природный газ — кислород». *Доклады Академии Наук РФ*, 2018, т. 478, № 4, с. 429–433, doi: <https://doi.org/10.7868/S0869565218040114>
- [3] Sun J., Zhou J., Liu S. et al. Numerical investigation of a rotating detonation engine under premixed/non-premixed conditions. *Acta Astronaut.*, 2018, vol. 152, pp. 630–638, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.09.012>
- [4] Liu Y., Wang Y., Li Y. et al. Spectral analysis and self-adjusting mechanism for oscillation phenomenon in H_2/O_2 continuously rotating detonation engine. *Chinese J. Aeronaut.*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 669–675, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2015.03.006>
- [5] Корпорация Data Physics: веб-сайт. URL: <https://www.dataphysics.com/> (дата обращения: 26.03.2022).
- [6] БЛИМ Синержи: веб-сайт. URL: <https://blms.ru/> (дата обращения: 26.03.2022).
- [7] Javh J., Slavic J., Boltezar M. High frequency modal identification on noisy high-speed camera data. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2018, vol. 98, pp. 344–351, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.05.008>
- [8] Ege K., Boutillon X., David B. High-resolution modal analysis. *J. Sound Vib.*, 2009, vol. 325, no. 4–5, pp. 852–869, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.04.019>
- [9] Ege K., Roozen N.B., Leclere Q. et al. Assessment of the apparent bending stiffness and damping of multilayer plates; modeling and experiment. *J. Sound Vib.*, 2018, vol. 426, pp. 129–149, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.04.013>

- [10] Marchetti F., Roozen N.B., Segers J. et al. Experimental methodology to assess the dynamic equivalent stiffness properties of elliptical orthotropic plates. *J. Sound Vib.*, 2021, vol. 495, art. 115897, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115897>
- [11] Кузнецов О.В., Токмачева Е.Н. *Инженерные методы расчета вибрационного состояния ракетных конструкций*. Москва, НТЦ Информтехника, 1992. 62 с.
- [12] 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)
- [13] Ross M., Jacobs L.D., Tipton G. et al. 6-DOF shaker test input derivation from field test. In: *Shock & vibration, aircraft/aerospace, energy harvesting, acoustic & optics*, Springer, vol. 9. 2017, pp. 11–22, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-54735-0_2
- [14] Brumat M., Slavic J., Boltezar M. Frequency based spatial damping identification – theoretical and experimental comparison. In: *Shock & vibration, aircraft/aerospace, energy harvesting, acoustic & optics*. Springer, vol. 9, 2017, pp. 23–29, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-54735-0_3
- [15] Аринчев С.В. 3-й 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] Rosso C., Bonisoli E., Bruzzone F. On the veering-phenomenon potential in high-speed gears design. In: *Topics in modal analysis & testing*. Springer, vol. 9, 2018, pp. 135–142, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-74700-2_14
- [2] Frolov S.M., Aksenov V.S., Ivanov V.S. et al. Rocket engine with continuous detonation combustion of the natural gas–oxygen propellant system. *Doklady Akademii Nauk RF*, 2018, vol. 478, no. 4, pp. 429–433, doi: <https://doi.org/10.7868/S0869565218040114> (in Russ.). (Eng. version: *Dokl. Phys. Chem.*, 2018, vol. 478, no. 2, pp. 31–34, doi: <https://doi.org/10.1134/S001250161802001X>)
- [3] Sun J., Zhou J., Liu S. et al. Numerical investigation of a rotating detonation engine under premixed/non-premixed conditions. *Acta Astronaut.*, 2018, vol. 152, pp. 630–638, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.09.012>
- [4] Liu Y., Wang Y., Li Y. et al. Spectral analysis and self-adjusting mechanism for oscillation phenomenon in H₂/O₂ continuously rotating detonation engine. *Chinese J. Aeronaut.*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 669–675, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2015.03.006>
- [5] *DataPhysics corporation: website*. URL: <https://www.dataphysics.com/> (accessed: 26.03.2022).
- [6] *BLM Sinerzhi: website*. URL: <https://blms.ru/> (accessed: 26.03.2022).
- [7] Javh J., Slavic J., Boltezar M. High frequency modal identification on noisy high-speed camera data. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2018, vol. 98, pp. 344–351, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.05.008>
- [8] Ege K., Boutillon X., David B. High-resolution modal analysis. *J. Sound Vib.*, 2009, vol. 325, no. 4–5, pp. 852–869, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.04.019>
- [9] Ege K., Roozen N.B., Leclere Q. et al. Assessment of the apparent bending stiffness and damping of multilayer plates; modeling and experiment. *J. Sound Vib.*, 2018, vol. 426, pp. 129–149, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.04.013>
- [10] Marchetti F., Roozen N.B., Segers J. et al. Experimental methodology to assess the dynamic equivalent stiffness properties of elliptical orthotropic plates. *J. Sound Vib.*, 2021, vol. 495, art. 115897, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115897>
- [11] Kuznetsov O.V., Tokmacheva E.N. *Inzhenernye metody rascheta vibratsionnogo sostoyaniya raketnykh konstruksiy* [Engineering methods for calculating vibratory condition of rocket constructions]. Moscow, NTTs Informtekhnika Publ., 1992. 62 p. (In Russ.).
- [12] 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)

- [13] Ross M., Jacobs L.D., Tipton G. et al. 6-DOF shaker test input derivation from field test. In: *Shock & vibration, aircraft/aerospace, energy harvesting, acoustic & optics*. Springer, vol. 9, 2017, pp. 11–22, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-54735-0_2
- [14] Brumat M., Slavic J., Boltezar M. Frequency based spatial damping identification – theoretical and experimental comparison. In: *Shock & vibration, aircraft/aerospace, energy harvesting, acoustic & optics*. Springer, vol. 9, 2017, pp. 23–29, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-54735-0_3
- [15] 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 18.04.2022

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 Engineering Science, Professor, Department of Aerospace Systems. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Аринчев С.В. Восьмиканальные частотные испытания цилиндрической оболочки со шпангоутом в диапазоне 1000...8000 Гц. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 11, с. 92–99, doi: 10.18698/0536-1044-2022-11-92-99

Please cite this article in English as:

Arinchev S.V. Eight-channel Frequency-Response Test of the Cylindrical-shell-and-ring Assembly in the Range 1000 to 8000 Hz. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 11, pp. 92–99, doi: 10.18698/0536-1044-2022-11-92-99