

Научная статья
УДК 539.3:534.1
DOI: [10.34759/trd-2022-123-03](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-03)

ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАНИЯ КАРБОНОВЫХ ТОНКОСТЕННЫХ РАЗОМКНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК НА СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Сергей Васильевич Серегин¹, Артем Юрьевич Добрышкин²✉,
Евгений Олегович Сысоев³, Екатерина Викторовна Журавлева⁴
^{1,2,3,4}Комсомольский-на-Амуре государственный университет, КнАГУ,
Комсомольск-на-Амуре, Россия
²wwwartem21@mail.ru✉

Аннотация. Тонкостенные цилиндрические оболочки имеют широкое применение в различных отраслях промышленности. Развитие техники выдвигает все более серьезные требования к прочности и устойчивости конструкций наряду с их невысоким весом и стоимостью. Такие требования применяются к воздушной технике, к беспилотным летательным аппаратам. Оптимальным решением во многих случаях является использование тонкостенных оболочек из карбоновых материалов, обладающих высокими прочностными качествами. Оптимальным решением во многих случаях является использование тонкостенных оболочек из карбоновых материалов, обладающих высокими прочностными качествами. Оболочечные конструкции подвергаются температурным, ветровым нагрузкам,

переменным атмосферным давлением во время полета летательных аппаратов и многим другим динамическим воздействиям. Поэтому, конструктивные материалы оболочек должны быть лёгкими и прочными. Наиболее часто в последнее время применяют карбоновые материалы, которые на порядок легче и прочнее металла. В условиях эксплуатации оболочки подвергаются высоким динамическим воздействиям, которые могут привести к неблагоприятным воздействиям. Однако, проблема динамики многослойных карбоновых оболочек на сегодняшний день не до конца изучена. Так, например, известные теоретические исследования, в ряде случаев, имеют значительные расхождения в значениях низших частот спектра колебаний армированных оболочек с численными расчетами, выполненными методом конечных элементов. Данное обстоятельство требует проведение экспериментального исследования поведения низших частот. В статье проведено экспериментальное исследование влияния многослойного армирования карбоновых тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек на их свободные колебания. Для экспериментального исследования влияния многослойности армирования карбоновых тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек на их свободные колебания, на базе Комсомольского-на-Амуре государственного университета были созданы экспериментальные образцы. Модели оболочек с однослойным армированием выполнялись из карбоновой ткани 2/2 12К-1000-600. Двухслойное армирование создавалось из слоя карбоновой ткани 2/2 12К-1000-200 и слоя ткани 2/2 12К-1000-400. Трёхслойное армирование создавалось из трех слоев карбоновой ткани 2/2 12К-1000-200. Выполнено сравнение экспериментальных данных с аналитическим решением. Выявлено увеличение частот колебаний карбоновых

тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек с увеличением количества слоев армирования карбоновой тканью по отношению к значениям частот, полученных аналитически.

Ключевые слова: колебания, оболочка, экспериментальные исследования, методика расчета.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках научного проекта, финансируемого за счет средств КнАГУ № ВН004/2020.

Для цитирования: Серегин С.В., Добрышкин А.Ю., Сысоев Е.О., Журавлева Е.В. Влияние армирования карбоновых тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек на свободные колебания // Труды МАИ. 2022. № 123. DOI: [10.34759/trd-2022-123-03](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-03)

THE INFLUENCE OF THE REINFORCEMENT OF CARBON THIN-WALLED OPEN CYLINDRICAL SHELLS ON FREE VIBRATIONS

Sergei V. Seregin¹, Artem Yu. Dobryshkin²✉,

Evgeniy O. Sysoev³, Ekaterina V. Zhuravlyova⁴

^{1,2,3,4}Komsomolsk-na-Amure State University, KnAGU, Komsomolsk-na-Amure, Russia

²wwwartem21@mail.ru✉

Abstract. Thin-walled cylindrical shells found wide application in various industries. The development of technology puts forward more and more serious requirements for the strength and stability of structures along with their low weight and cost. Such requirements

are being applied to aeronautical engineering and unmanned aerial vehicles. The optimal solution in many cases consists in applying thin-walled shells made of carbon materials with high strength properties. The shell structures are being exposed to temperature and wind loads, variable atmospheric pressure during the aircraft flight and many other dynamic impacts. Thus, the structural materials of the shells should be lightweight and durable. Recently, carbon materials, which are an order of magnitude lighter and stronger than metal, are being applied more often. Under operating conditions, shells are being exposed to high dynamic stresses that may lead to adverse effects. However, the problem of the multilayer carbon shells dynamics is not fully understood up to now. Thus, for example, the known theoretical studies in a number of cases, have significant discrepancies in the values of the lowest frequencies of the vibration spectrum of reinforced shells with numerical calculations performed by the finite element method. This fact requires an experimental study on the behavior of low frequencies. The article provides an experimental study of the effect of multilayer reinforcement of thin-walled carbon fiber open cylindrical shells on their free vibrations. Experimental samples were created on the Komsomolsk-on-Amur State University basis for the experimental study of the effect of multilayer reinforcement of carbon thin-walled open cylindrical shells on their free vibrations. Models of shells with single-layer reinforcement were made of 2/2 12K-1000-600 carbon fabric. Two-layer reinforcement was created from a layer of 2/2 12K-1000-200 carbon fabric and a layer of 2/2 12K-1000-400 fabric. A three-layer reinforcement was created from three layers of 2/2 12K-1000-200 carbon fabric. The experimental data was compared with the analytical solution. The experiments revealed an increase in the vibration frequencies of carbon thin-walled open cylindrical shells with an

increase in the number of layers of carbon fabric reinforcement in relation to the values of frequencies obtained analytically.

Keywords: vibrations, shell, experimental research, calculation method

Funding: the research was accomplished within the frameworks of the scientific project financed by the funds of the KnAGU No. BH004/2020.

For citation: Seregin S.V., Dobryshkin A.Yu., Sysoev E.O., Zhuravlyova E.V. The influence of the reinforcement of carbon thin-walled open cylindrical shells on free vibrations. *Trudy MAI*, 2022, no.123. DOI: [10.34759/trd-2022-123-03](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-03)

Введение

Тонкостенные цилиндрические оболочки имеют широкое применение в различных отраслях промышленности. Развитие воздушной и космической техники выдвигает все более серьезные требования к прочности и устойчивости конструкций наряду с их невысоким весом и стоимостью. Оптимальным решением во многих случаях является использование тонкостенных оболочек из карбоновых материалов, обладающих высокими прочностными качествами. Оболочечные конструкции подвергаются температурным, ветровым нагрузкам, переменным атмосферным давлением во время полета летательных аппаратов и многим другим динамическим воздействиям. Поэтому, конструктивные материалы оболочек должны быть лёгкими и прочными. Наиболее часто в последнее время применяют карбоновые материалы, которые на порядок легче и прочнее металла.

Однако, проблема динамики многослойных карбоновых оболочек на сегодняшний день не до конца изучена. Так, например, известные теоретические исследования, в ряде случаев, имеют значительные расхождения в значениях низших частот спектра колебаний армированных оболочек с численными расчетами, выполненными методом конечных элементов. Данное обстоятельство требует проведение экспериментального исследования поведения низших частот [1-2].

Методы исследования

Для экспериментального исследования влияния многослойности армирования карбоновых тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек на их свободные колебания, на базе Комсомольского-на-Амуре государственного университета были созданы экспериментальные образцы. Модели оболочек с однослойным армированием выполнялись из карбоновой ткани 2/2 12К-1000-600. Двухслойное армирование создавалось из слоя карбоновой ткани 2/2 12К-1000-200 и слоя ткани 2/2 12К-1000-400. Трехслойное армирование создавалось из трех слоев карбоновой ткани 2/2 12К-1000-200, см. рис. 1.

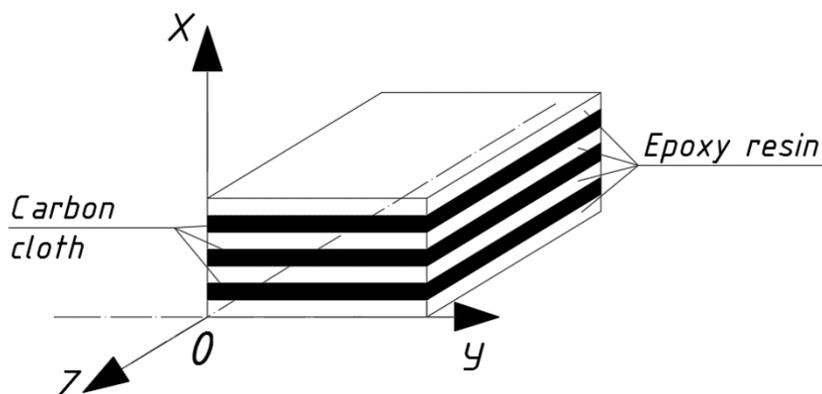


Рис 1. Элемент карбоновой тонкостенной оболочки при трехслойном армировании.

Размеры моделей тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек были приняты следующие: $H=R= 200 \text{ mm}$, $L = 400 \text{ mm}$, $h = 1,2 \text{ mm}$. Колебания задавались молотком AU03 сила $P = 0,2 \text{ н}$. Амплитуда и частота колебаний оболочек измерялась с использованием высокоскоростного вибрметра HSV2000 с точностью 1 микрон (амплитуда) в диапазоне 1Гц - 50 КГц (частота). Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

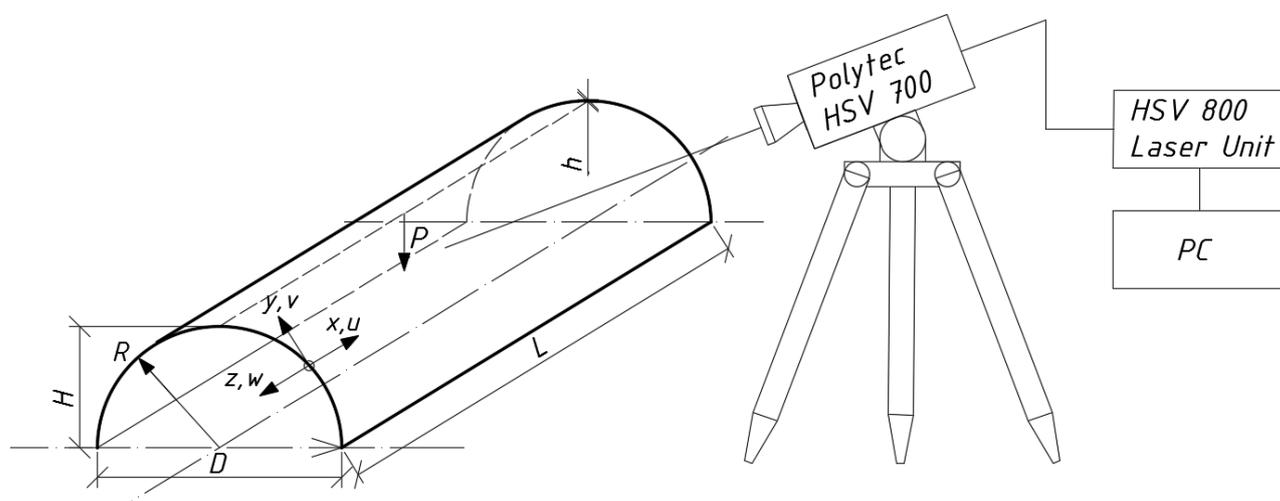


Рис. 2 Схема экспериментальной установки.

Предположим, что динамическое поведение подкрепленных оболочек идентично поведению оболочек с несовершенствами формы, изменяющихся по закону: [2]

$$w_0(y) = f_0 \sin(\beta y + \varphi_0); \beta = \frac{n}{R}, \quad (1)$$

где f_0 — амплитуда начальных отклонений; φ_0 — начальный угол отсчета.

Учитывая, что начальные несовершенства, приводят к взаимодействию изгибных и радиальных форм колебаний оболочки [3-6], тогда ее прогиб будет аппроксимирован выражением:

$$w(x, y, t) = \sum_{m,n} [f_{1m,n}(t) \sin \beta_n y + f_{2m,n}(t) \cos \beta_n y + f_{3m,n}(t)] \sin \alpha_m x; \quad (2)$$

$$\beta_n = \frac{n}{R}; \quad \alpha_m = \frac{m\pi}{l}.$$

В уравнении (2) координаты $f_{1m,n}$ и $f_{2m,n}$ отвечают изгибным, а $f_{3m,n}$ радиальным формам колебаний оболочки [7-11].

Отсюда находим функцию напряжений $\Phi(x, y, t)$:

$$\Phi = E \left\{ \sum_{m,n} [\Phi_{0m,n} \sin \beta_n y + \Phi_{1m,n} \cos \beta_n y + \Phi_{2m,n} \sin(\beta_0 + \beta_n) y + \Phi_{3m,n} \sin(\beta_0 - \beta_n) y + \Phi_{4m,n} \cos(\beta_0 + \beta_n) y + \Phi_{5m,n} \cos(\beta_0 - \beta_n) y + \Phi_{6m,n} \cos \beta_0 y + \Phi_{7m,n}] \sin \alpha_m x + \frac{\Phi_{01} x^2}{2} + \Phi_{02} xy + \frac{\Phi_{03} y^2}{2} \right\}. \quad (3)$$

Первые восемь коэффициентов, входящих в (3), равны:

$$\Phi_{0m,n} = \frac{\alpha_m^2}{R(\alpha_m^2 + \beta_n^2)^2} f_{1m,n}; \quad \Phi_{1m,n} = \frac{\alpha_m^2}{R(\alpha_m^2 + \beta_n^2)^2} f_{2m,n};$$

$$\Phi_{2m,n} = -\frac{\alpha_m^2 \beta_0^2 f_0 f_{1m,n}}{2(\alpha_m^2 + (\beta_0 + \beta_n)^2)^2}; \quad \Phi_{3m,n} = \frac{\alpha_m^2 \beta_0^2 f_0 f_{1m,n}}{2(\alpha_m^2 + (\beta_0 - \beta_n)^2)^2} \quad (4)$$

$$\Phi_{4m,n} = -\frac{\alpha_m^2 \beta_0^2 f_0 f_{2m,n}}{2(\alpha_m^2 + (\beta_0 + \beta_n)^2)^2}; \quad \Phi_{5m,n} = -\frac{\alpha_m^2 \beta_0^2 f_0 f_{1m,n}}{2(\alpha_m^2 + (\beta_0 - \beta_n)^2)^2};$$

$$\Phi_{6m,n} = -\frac{\alpha_m^2 \beta_0^2 f_0 f_{3m,n}}{(\alpha_m^2 + \beta_n^2)^2}; \quad \Phi_{7m,n} = \frac{1}{\alpha_m^2 R} f_{3m,n}.$$

Удовлетворив краевым условиям [12-16]:

$$\frac{h}{b\pi R} \int_0^{b\pi R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} dy = -\frac{h}{b\pi R} \int_0^{b\pi R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} dy = 0 \text{ при } x = 0, x = l.$$

получим, что $\Phi_{01} = \Phi_{02} = \Phi_{03} = 0$.

Ортогонализация линеаризованного уравнения движения имеет вид:

$$\frac{1}{E} \nabla^4 \Phi = -\frac{1}{2} [L(w_0 + w, w_0 + w) - L(w_0, w_0)] - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad (5)$$

$$\frac{D}{h} \nabla^4 w = L(\Phi, w_0 + w) \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{q}{h} - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

где ∇^4 - бигармонический оператор Лапласа, приводит к системе связанных динамических уравнений относительно безразмерных координат $\alpha_{im,n} =$

$$\frac{f_{m,n}}{h} \quad (i = 1,2,3): \quad (6)$$

Путем введения нормальных координат можно показать, что для определения форм преимущественно изгибных форм колебаний оболочки с $w_0(y)$ вида (5) необходимо "просуммировать" формы изгибных колебаний идеальной разомкнутой оболочки только по окружной координате u . Рассматривая некоторые частные случаи, когда число несовершенств оболочки по окружности (то есть, количество продольных укреплений) такое же как и количество волн оболочки, образовавшиеся при ее колебаниях $n = n_0$ [17-22] получаем следующие результаты

Результаты

На рисунке 3 показаны результаты теоретических расчетов по предложенной математической модели расчета частоты колебаний тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек.

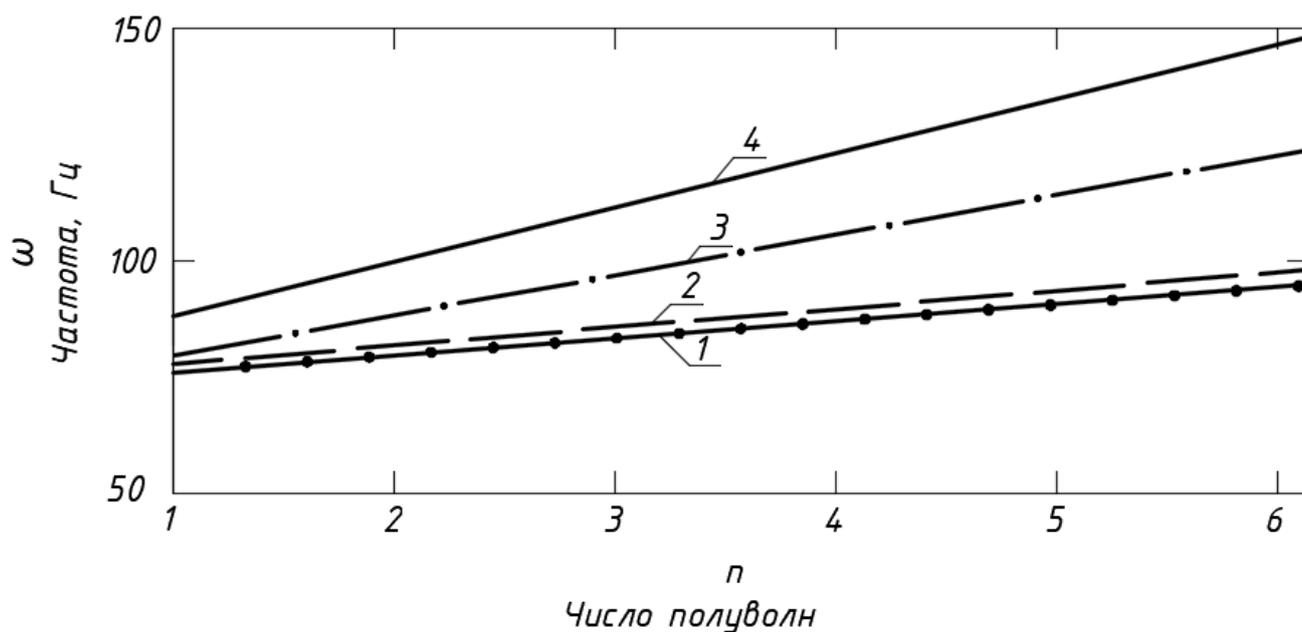


Рис. 3 Зависимость частоты колебаний карбоновых тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек от количества волн при: 4 - трехслойном армировании; 3 - двухслойном армировании, 2 - однослойном армировании; 1 - график теоретического расчета частоты колебаний оболочки.

Из графика видно, что результаты теоретического расчета удовлетворительны по отношению к результатам проведенного эксперимента с однослойным армированием, отклонение составляет 7-8 %.

При двухслойном армировании тонкостенной разомкнутой цилиндрической карбоновой оболочки, отклонение величин частот колебаний значительно выше и в исследуемом диапазоне достигает до 20%. А при трехслойном армировании отклонение теории от эксперимента увеличивается до 45 %.

Выводы

С увеличением слоев армирования карбоновой ткани увеличиваются частоты колебаний оболочки. В математическую модель расчета частоты колебаний разомкнутой цилиндрической оболочки необходимо вводить показатель, учитывающий многослойность ее армирования.

Список источников

1. Кубенко В.Д., Ковальчук П.С., Краснопольская Т.С. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек. - Киев: Наукова думка, 1984. – 220 с.
2. Антуфьев Б.А. Колебания неоднородных тонкостенных конструкций: монография. - М.: Изд-во МАИ, 2011. – 176 с.
3. Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн Сит Наинг. Аналитическое и экспериментальное исследование свободных колебаний разомкнутых оболочек из сплава Д19, несущих систему присоединенных масс // Труды МАИ. 2018. № 98.
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90079>
4. Гусева Ж.И. Особенности планирования производства на авиационном предприятии // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 4 (52). С. 99-104.
5. Z. Wang, Q. Han, D. H. Nash, P. Liu. Investigation on inconsistency of theoretical solution of thermal buckling critical temperature rise for cylindrical shell // Thin-Walled Structures, 2017, no. 119, pp. 438-446. DOI: [10.1016/j.tws.2017.07.002](https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.07.002)

6. Sysoev O., Dobryshkin A., Baenkhaev A. Investigation to the location influence of the unified mass on the formed vibrations of a thin containing extended shell // Materials Science Forum, 2019, vol. 945, pp. 885-892.
DOI:[10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885)
7. Sysoev O., Dobryshkin A. Natural vibration of a thin desing with an added mass as the vibrations of a cylindrical shell and curved batten. ISSN 2095-7262 CODEN HKDXH2 // Journal of Heilongjiang university of science and technology, 2018, vol. 28, no. 1, pp.75–78.
8. Y. Qu, Y. Chen, X. Long, H. Hua, and G. Meng. Free and forced vibration analysis of uniform and stepped circular cylindrical shells using a domain decomposition method // Applied Acoustics, 2013, vol. 74, no. 3, pp. 425-439.
9. Foster N., Fernández-Galiano L. Norman Foster: in the 21st Century, AV, Monografías, Artes Gráficas Palermo, 2013, pp. 163–164.
10. Eliseev V.V., Moskalets A.A., Oborin E.A. One-dimensional models in turbine blades dynamics // Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2016, vol. 9, pp. 93-104.
DOI:[10.1007/978-3-319-29579-4_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29579-4_10)
11. Белосточный Г.Н., Мыльцина О.А. Статическое и динамическое поведение пологих оболочек под действием быстропеременных температурно-силовых воздействий // Труды МАИ. 2015. № 82. URL:
<http://trudymai.ru/published.php?ID=58524>
12. Кузнецова Е.Л., Тарлаковский Д.В., Федотенков Г.В., Медведский А.Л. Воздействие нестационарной распределенной нагрузки на поверхность упругого слоя // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=46621>

13. Феоктистов С.И. Определение растягивающих усилий вдоль образующей пуансона с учётом трения при изгибе с растяжением // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 1 (49). С. 76-82. DOI: [10.17084/20764359_2021_49_76](https://doi.org/10.17084/20764359_2021_49_76)
14. Канашин И.В., Григорьева А.Л., Хромов А.И., Григорьев Ян.Ю., Машевский В.А. Растяжение сжимаемой полосы с непрерывным полем скоростей перемещений в условиях плоской деформации // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3 (51). С. 39-41. DOI: [10.17084/20764359-2021-51-39](https://doi.org/10.17084/20764359-2021-51-39)
15. Demin A.A., Golubeva T.N., Demina A.S. The program complex for research of fluctuations' ranges of plates and shells in magnetic field // 11th Students' Science Conference «Future Information technology solutions», Bedlewo, 3-6 October 2013, pp. 61-66.
16. Нуштаев Д.В., Жаворонок С.И., Клышников К.Ю., Овчаренко Е.А. Численно-экспериментальное исследование деформирования и устойчивости цилиндрической оболочки ячеистой структуры при осевом сжатии // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=58589>
17. Грушенкова Е.Д., Могилевич Л.И., Попов В.С., Попова А.А. Продольные и изгибные колебания трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем, контактирующей со слоем вязкой жидкости // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105618>
18. Hautsch N., Okhrin O., Ristig A. Efficient iterative maximum likelihood estimation of highparameterized time series models, Berlin, Humboldt University, 2014, 34 p.

19. Саблин П.А., Щетинин В.С. Повышение точности механообработки с помощью использования бесконтактных опор // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3 (51). С. 104-106. DOI: [10.17084/20764359-2021-51-104](https://doi.org/10.17084/20764359-2021-51-104)
20. Андрианов И.К. Численная модель многокритериальной оптимизации тепловой защиты оболочечных элементов в условиях теплового и силового нагружения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3 (51). С. 14-20. DOI: [10.17084/20764359-2021-51-14](https://doi.org/10.17084/20764359-2021-51-14)
21. Иванкова Е.П. Моделирование и оптимизация выбора свойств материалов и структуры многослойных оболочковых форм по выплавляемым моделям // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3 (51). С. 85-89. DOI: [10.17084/20764359-2021-51-85](https://doi.org/10.17084/20764359-2021-51-85)
22. Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Одинокоев В.И., Иванкова Е.П., Усанов Г.И., Петров В.В. Разработка новых структур многослойных оболочковых форм по выплавляемым моделям // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 7 (47). С. 104-107.

References

1. Kubenko V.D., Koval'chuk P.S., Krasnopol'skaya T.S. *Nelineinoe vzaimodeistvie form izgibnykh kolebaniy tsilindricheskikh obolochek* (Nonlinear interaction of shapes of cylindrical shells bending vibrations), Kiev, Naukova dumka, 1984, 220 p.

2. Antuf'ev B.A. *Kolebaniya neodnorodnykh tonkostennykh konstruktsii* (Oscillations of inhomogeneous thin-walled structures), Moscow, Izd-vo MAI, 2011, 176 p.
3. Sysoev O.E., Dobryshkin A.Yu., Nein Sit Naing. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90079>
4. Guseva Zh.I. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 4 (52), pp. 99-104.
5. Z. Wang, Q. Han, D. H. Nash, P. Liu. Investigation on inconsistency of theoretical solution of thermal buckling critical temperature rise for cylindrical shell, *Thin-Walled Structures*, 2017, no. 119, pp. 438-446. DOI: [10.1016/j.tws.2017.07.002](https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.07.002)
6. Sysoev O., Dobryshkin A., Baenkhaev A. Investigation to the location influence of the unified mass on the formed vibrations of a thin containing extended shell, *Materials Science Forum*, 2019, vol. 945, pp. 885-892. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885)
7. Sysoev O., Dobryshkin A. Natural vibration of a thin desing with an added mass as the vibrations of a cylindrical shell and curved batten. ISSN 2095-7262 CODEN HKDXH2, *Journal of Heilongjiang university of science and technology*, 2018, vol. 28, no. 1, pp.75–78.
8. Y. Qu, Y. Chen, X. Long, H. Hua, and G. Meng. Free and forced vibration analysis of uniform and stepped circular cylindrical shells using a domain decomposition method, *Applied Acoustics*, 2013, vol. 74, no. 3, pp. 425-439.
9. Foster N., Fernández-Galiano L. Norman Foster: in the 21st Century, AV, Monografías, *Artes Gráficas Palermo*, 2013, pp. 163–164.

10. Eliseev V.V., Moskalets A.A., Oborin E.A. One-dimensional models in turbine blades dynamics, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 9, pp. 93-104. DOI:[10.1007/978-3-319-29579-4_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29579-4_10)
11. Belostochnyi G.N., Myl'tsina O.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58524>
12. Kuznetsova E.L., Tarlakovskii D.V., Fedotenkov G.V., Medvedskii A.L. *Trudy MAI*, 2013, no. 71. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=46621>
13. Feoktistov S.I. Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2021, no. 1 (49), pp. 76-82. DOI: [10.17084/20764359_2021_49_76](https://doi.org/10.17084/20764359_2021_49_76)
14. Kanashin I.V., Grigor'eva A.L., Khromov A.I., Grigor'ev Yan.Yu., Mashevskii V.A. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 3 (51), pp. 39-41. DOI: [10.17084/20764359-2021-51-39](https://doi.org/10.17084/20764359-2021-51-39)
15. Demin A.A., Golubeva T.N., Demina A.S. The program complex for research of fluctuations' ranges of plates and shells in magnetic field, *11th Students' Science Conference «Future Information technology solutions»*, Bedlewo, 3-6 October 2013, pp. 61-66.
16. Nushtaev D.V., Zhavoronok S.I., Klyshnikov K.Yu., Ovcharenko E.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58589>
17. Grushenkova E.D., Mogilevich L.I., Popov V.S., Popova A.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105618>
18. Hautsch N., Okhrin O., Ristig A. *Efficient iterative maximum likelihood estimation of highparameterized time series models*, Berlin, Humboldt University, 2014, 34 p.

19. Sablin P.A., Shchetinin V.S. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 3 (51), pp. 104-106. DOI: [10.17084/20764359-2021-51-104](https://doi.org/10.17084/20764359-2021-51-104)
20. Andrianov I.K. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no 3 (51), pp. 14-20. DOI: [10.17084/20764359-2021-51-14](https://doi.org/10.17084/20764359-2021-51-14)
21. Ivankova E.P. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 3 (51), pp. 85-89. DOI: [10.17084/20764359-2021-51-85](https://doi.org/10.17084/20764359-2021-51-85)
22. Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Odinkov V.I., Ivankova E.P., Usanov G.I., Petrov V.V. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 7 (47), pp. 104-107.

Статья поступила в редакцию 10.01.2022; одобрена после рецензирования 30.01.2022; принята к публикации 20.04.2022.

The article was submitted on 10.01.2022; approved after reviewing on 30.01.2022; accepted for publication on 20.04.2022.