

УДК 539.3

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_23

EDN: FDQMOW

КОЛЕБАНИЯ ПЯТИСЛОЙНОЙ КРУГОВОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ МГНОВЕННО ПРИЛОЖЕННОЙ НАГРУЗКЕ

Е. А. Лачугина*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

VIBRATIONS OF A FIVE-LAYERED CIRCULAR PLATE UNDER A LOCALLY INSTANTLY APPLIED LOAD

E. A. Lachugina*Belarusian State University of Transport, Gomel*

Аннотация. Предложена постановка начально-краевой задачи о вынужденных колебаниях пятислойной несимметричной по толщине круговой пластины под действием мгновенно приложенной локальной нагрузки, распределенной по кругу. Центральный и внешние несущие слои предполагаются тонкими, подчиняющимися гипотезам Кирхгофа. Два относительно толстых заполнителя легкие, для них справедлива гипотеза Тимошенко. Система дифференциальных уравнений движения получена вариационным методом. Аналитическое решение задачи построено методом разложения искомых перемещений в ряд по системе собственных ортонормированных функций. Проведен численный анализ полученного решения.

Ключевые слова: пятислойная круговая пластина, несимметричность по толщине, вынужденные колебания, локальная нагрузка, перемещения.

Для цитирования: Лачугина, Е. А. Колебания пятислойной круговой пластины при локальной мгновенно приложенной нагрузке / Е. А. Лачугина // Проблемы физики, математики и техники. – 2026. – № 2 (67). – С. 23–28. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_23. – EDN: FDQMOW

Abstract. The formulation of an initial-boundary value problem for forced vibrations of a five-layer circular plate with thickness asymmetry under the action of an instantaneously applied local load distributed over a circle is proposed. The central and outer load-bearing layers are assumed to be thin and obey the Kirchhoff hypotheses. The two relatively thick fillers are lightweight; the Timoshenko hypothesis is valid for them. The system of differential equations of motion is derived by the variational method. An analytical solution to the problem is constructed by expanding the sought-for displacements into a series in a system of orthonormal eigenfunctions. A numerical analysis of the obtained solution is performed.

Keywords: five-layer circular plate, thickness asymmetry, forced vibrations, local load, displacements.

For citation: Lachugina, E. A. Vibrations of a five-layered circular plate under a locally instantly applied load / E. A. Lachugina // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2026. – № 2 (67). – P. 23–28. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_23 (in Russian). – EDN: FDQMOW

Введение

Современные тенденции в транспортном машиностроении и строительстве характеризуются постоянным поиском материалов и конструкций, сочетающих высокую удельную прочность, жесткость и функциональную эффективность. В этом контексте многослойные композитные конструкции, в частности трехслойные и пятислойные пластины, нашли широкое применение благодаря своей способности оптимизировать массо-габаритные характеристики при одновременном обеспечении требуемых несущих свойств, термической и акустической изоляции.

В последние годы наблюдается повышенный интерес к применению и расчету композитных элементов конструкций, чему посвящены фундаментальные монографии по механике деформируемого твердого тела и терморационному деформированию трехслойных элементов

[1]–[5]. В них изложены современные подходы к выбору кинематических гипотез несущих слоев и заполнителей, анализируются возможности описания физически нелинейного и реономного деформирования материалов слоев, повреждаемости при циклических нагружениях, изложена асимптотическая теория термоупругого поведения пластин и оболочек. Теоретической базой для подобных исследований служат классические и современные курсы сопротивления и механики материалов [6]–[8].

Деформирование упругих и упругопластических трехслойных стержней в температурном поле рассмотрено в статьях [9], [10]. Исследованию изгиба трехслойных пластин на упругом основании посвящены публикации [11]–[13]. Характеристики изгиба сэндвич-панелей с ячеистым заполнителем исследованы в [14]. Деформирование круговых трехслойных пластин со

сжимаемым заполнителем или нагруженных в своей плоскости изучено в [15]–[16]. Аналитическое решение и численное исследование задачи об изгибе круглой пятислойной пластины локальной нагрузки приведено в [17].

Динамике цилиндрических и сферических оболочечных структур, а также нестационарному контактному взаимодействию упругих тел посвящены работы [18]–[21]. Работы [22], [23] посвящены исследованию собственных колебаний трехслойных и пятислойных стержней.

Разработке математических моделей и решению задач о собственных колебаниях пятислойных круговых пластин с различными типами заполнителей и несущих слоев посвящены публикации [24]–[29]. Вынужденные колебания в настоящее время не исследованы.

В предлагаемой работе рассмотрены вынужденные колебания пятислойных круговых пластин под действием мгновенно приложенной локальной равномерно распределенной нагрузки.

1 Постановка задачи

Постановка начально-краевой задачи проведена в цилиндрической системе координат, связанной со срединной плоскостью центрального слоя. Пластина состоит из трёх высокопрочных несущих слоёв (центрального и двух внешних), деформация которых подчиняется гипотезе Кирхгофа, и двух толстых лёгких заполнителей, в которых справедлива гипотеза Тимошенко (нормаль остаётся прямой, но не перпендикулярной срединной поверхности слоя). Нормали в заполнителях поворачиваются на некоторые дополнительные углы $\psi_i(r, t)$ ($i = 1, 2$) – относительные сдвиги (рисунок 1.1). Слои идеально склеены, что исключает взаимное проскальзывание. Деформации предполагаются малыми, работа касательных напряжений в заполнителях пренебрегается. На контуре пластины предполагается наличие жесткой диафрагмы, которая препятствует относительному сдвигу слоев ($\psi_i = 0$ при $r = r_0$).

Предполагается, что осесимметричная нагрузка $q(r, t)$ действует локально по кругу на внешнюю поверхность верхнего несущего слоя (2):

$$q(r, t) = q_0 H_0(b - r), \quad (1.1)$$

где $q_0 = \text{const}$, $H_0(b - r)$ – функция Хэвисайда [1], которая отлична от нуля в интервале $[0, b]$.

Искомые функции являются: прогиб пластины $w(r, t)$, относительные сдвиги в заполнителях $\psi_i(r, t)$ и радиальное перемещение срединной плоскости внутреннего несущего слоя $u(r, t)$. Они не зависят от угловой координаты φ в силу осесимметричности нагрузки. Радиальные перемещения изменяются линейно по толщине каждого слоя,

$$u_r^{(4)} = u - zw_{,r} + h_3 \psi_1, \\ (0,5h_1 + h_5 \leq z \leq 0,5h_1 + h_5 + h_4),$$

$$u_r^{(5)} = u - zw_{,r} + (z - 0,5h_1) \psi_1, \\ (0,5h_1 \leq z \leq 0,5h_1 + h_5),$$

$$u_r^{(1)} = u - zw_{,r}, \quad (-0,5h_1 \leq z \leq 0,5h_1),$$

$$u_r^{(3)} = u - zw_{,r} + (z + 0,5h_1) \psi_2, \\ (-0,5h_1 - h_3 \leq z \leq -0,5h_1),$$

$$u_r^{(2)} = u - zw_{,r} - h_3 \psi_2, \\ (-0,5h_1 - h_3 - h_2 \leq z \leq -0,5h_1 - h_3),$$

тангенциальные смещения в этих слоях ($u_\varphi^{(k)} = 0$, $k = 1, 2, 3, 4, 5$ – номер слоя) отсутствуют.

В работе [28] были исследованы собственные колебания рассматриваемой пластины. В данном случае система уравнений движения будет отличаться наличием локальной распределенной нагрузки (1.1) в правой части четвертого уравнения:

$$L_2(a_1 u - a_2 w_{,r} + a_3 \psi_1 - a_4 \psi_2) = 0,$$

$$L_2(a_3 u - a_5 w_{,r} + a_6 \psi_1) = 0,$$

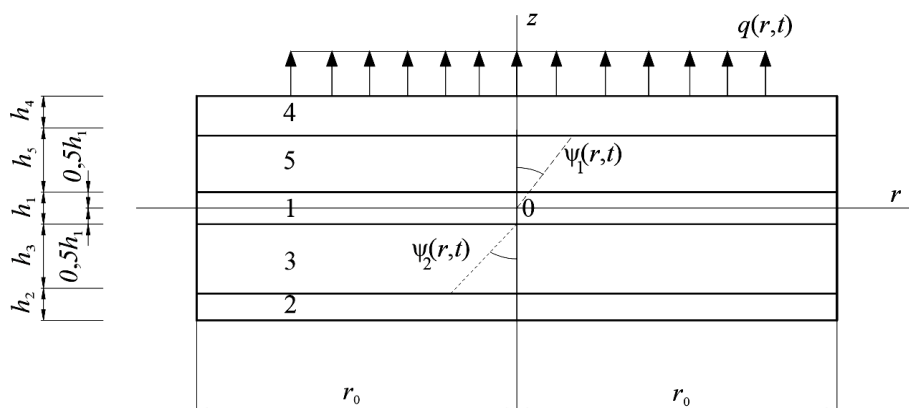


Рисунок 1.1 – Расчетная схема пятислойной пластины под действием локальной нагрузки

$$\begin{aligned} L_2(-a_4 u - a_7 w_{,r} + a_8 \psi_2) &= 0, \\ L_3(a_2 u - a_5 w_{,r} + a_5 \psi_1 + a_7 \psi_2) - M_0 \ddot{w} &= \\ &= -q_0 H_0(b-r), \end{aligned} \quad (1.2)$$

где a_i – коэффициенты, выраженные через геометрические и упругие характеристики слоев [28]; запятая в нижнем индексе обозначена производная по радиальной координате; L_2, L_3 – дифференциальные операторы

$$\begin{aligned} L_2(g) &\equiv g_{,rr} + \frac{g_{,r}}{r} - \frac{g}{r^2}, \\ L_3(g) &\equiv g_{,rrr} + \frac{2g_{,rr}}{r} - \frac{g_{,r}}{r^2} + \frac{g}{r^3}. \end{aligned}$$

При замыкании начально-краевой задачи к системе уравнений (1.1) необходимо добавить граничные:

$$u = \psi_1 = \psi_2 = w = w_{,r} = 0, \text{ при } r = r_0, \quad (1.3)$$

и начальные условия:

$$w = 0, \quad \dot{w} = 0, \text{ при } t = 0. \quad (1.4)$$

Таким образом, начально-краевая задача о вынужденных колебаниях пятислойной несимметричной круговой пластины при локальной равномерно распределенной нагрузке описывается системой уравнений движения (1.2), граничными (1.3) и начальными условиями (1.4).

2 Решение начально-краевой задачи

Решение задачи о вынужденных колебаниях круговой пятислойной пластины проводится с помощью разложения искомого перемещения $u(r, t)$, $\psi_1(r, t)$, $\psi_2(r, t)$, $w(r, t)$ и внешней нагрузки $q(r, t)$ в ряды по системам собственных ортонормированных функций v_n :

$$\begin{aligned} u(r, t) &= b_1 \sum_{n=0}^{\infty} \phi_n T_n(t), \\ \psi_1(r, t) &= b_2 \sum_{n=0}^{\infty} \phi_n T_n(t), \\ \psi_2(r, t) &= b_3 \sum_{n=0}^{\infty} \phi_n T_n(t), \\ w(r, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} v_n T_n(t), \\ q(r, t) &= M_0 \sum_{n=0}^{\infty} v_n q_n(t), \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\text{где } v_n \equiv \frac{1}{d_n} \left[J_0(\beta_n r) - \frac{J_0(\beta_n r_0)}{I_0(\beta_n r_0)} I_0(\beta_n r) \right],$$

$$\phi_n = v_{n,r},$$

$$T_n(t) - \text{искомая функция времени.}$$

Равномерная сходимость рядов (1.5), гарантированная полнотой применяемых систем собственных функций, позволяет рассматривать искомые функции как непрерывные и дифференцируемые.

Для получения выражений коэффициентов в разложении внешней нагрузки в ряд по системе собственных функций $q_n(t)$ умножим последнее из соотношений (2.1) на собственную функцию $v_n(\beta_n r)$ и выполним интегрирование вдоль радиуса пластины:

$$\begin{aligned} \int_0^{r_0} q(r, t) v_n r dr &= M_0 \int_0^{r_0} \sum_{m=0}^{\infty} v_m q_m(t) v_n r dr = \\ &= M_0 \sum_{m=0}^{\infty} q_m(t) \int_0^{r_0} v_m v_n r dr. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Полученная система собственных функций является ортонормированной, поэтому

$$\int_0^{r_0} v_m v_n r dr = \begin{cases} 1, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases}.$$

Следовательно, в правой части уравнения (2.2) отличен от нуля только коэффициент

$$q_n(t) = \frac{1}{M_0} \int_0^{r_0} q(r, t) v_n r dr. \quad (2.3)$$

Система дифференциальных уравнений (1.2) после линейных преобразований и двукратного интегрирования первых трех уравнений приводится к виду:

$$\begin{aligned} u &= b_1 w_{,r} + C_1 r + \frac{C_2}{r}, \\ \psi_1 &= b_2 w_{,r} + C_3 r + \frac{C_4}{r}, \\ \psi_2 &= b_3 w_{,r} + C_5 r + \frac{C_6}{r}, \\ L_3(w_{,r}) + M^4 \ddot{w} &= -Dq, \end{aligned} \quad (2.4)$$

где

$$D = a_6 a_8 b_4 / (b_4 b_6 - b_5^2).$$

Подставив прогиб и нагрузку из (2.1), (2.3) в четвертое уравнение системы (2.4), имеем

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} (L_3(v_{n,r}) T_n(t) + M^4 v_n \ddot{T}_n(t)) &= \\ &= -M_0 D \sum_{n=0}^{\infty} v_n q_n(t). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Собственные функции $v_n(\beta_n r)$ удовлетворяют уравнению [29]:

$$L_3(v_{n,r}) - \beta^4 v_n = 0. \quad (2.6)$$

Подставим (2.6) в (2.5) и с учетом $\beta^4 = M^4 \omega^2$, получим

$$M^4 \sum_{n=0}^{\infty} v_n (T_n \omega_n^2 + \ddot{T}_n) = -M^4 \sum_{n=0}^{\infty} v_n q_n. \quad (2.7)$$

Приравнявая коэффициенты перед собственными ортонормированными функциями в (2.7), получим уравнение для определения искомого функции времени $T_n(t)$, входящей в (2.1):

$$\ddot{T}_n + \omega_n^2 T_n = q_n. \quad (2.8)$$

Решение уравнения (2.8) будет следующим

$$T_n(t) = A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t) + \frac{1}{\omega_n} \int_0^t \sin(\omega_n(t-\tau)) q_n(\tau) d\tau. \quad (2.9)$$

В нашем случае, при однородных начальных условиях (1.4) коэффициенты A_n , B_n нулевые. Подставив нагрузку (1.1) в формулу (2.3), получим выражение для параметров $q_n(t)$:

$$q_n(t) = \frac{q_0}{M_0 d_n} \int_0^{r_0} H_0(b-r) \times \left(J_0(\beta_n r) - \frac{J_0(\beta_n r_0)}{I_0(\beta_n r_0)} I_0(\beta_n r) \right) r dr.$$

Отсюда

$$q_n(t) = \frac{q_0 b}{M_0 d_n \beta_n} \left(J_1(\beta_n b) - \frac{J_0(\beta_n)}{I_0(\beta_n)} I_1(\beta_n b) \right). \quad (2.10)$$

При постоянной нагрузке q_0 и нулевых начальных условиях движения функция времени $T_n(t)$ (2.9) с учетом (2.10) принимает вид:

$$T_n(t) = \frac{q_0 b (1 - \cos(\omega_n t))}{M_0 d_n \beta_n \omega_n^2} \times \left(J_1(\beta_n b) - \frac{J_0(\beta_n r_0)}{I_0(\beta_n r_0)} I_1(\beta_n b) \right). \quad (2.11)$$

Таким образом, искомые перемещения в пятислойной пластине следуют из соотношений (2.1) с учетом функции времени (2.11). При $b = r_0$ из (2.11) следует функция времени в решении задачи о колебаниях пятислойной пластины при нагрузке, распределенной по внешней поверхности верхнего слоя.

3 Численные результаты

Числовые результаты приведены для рассматриваемой пластины единичного радиуса ($r_0 = 1$ м). Материалы слоев: для несущих – Д16Т, для заполнителей – фторопласт-4. Толщины: $h_2 = 0,01$; $h_4 = 0,03$; $h_1 = 0,02$; $h_3 = 0,2$; $h_5 = 0,2$.

Рисунок 3.1 иллюстрирует изменение прогиба $w(r, t_0) - a$, радиального перемещения $u(r, t_0) - b$ и относительных сдвигов $\psi_1(r, t_0)$, $\psi_2(r, t_0) - \varepsilon$, ε вдоль радиуса пластины при радиусах пятна нагрузки: 1 – $b = 0,5$; 2 – $b = 1$. Интенсивность нагрузки – $q_0 = 70$ кПа. Графики соответствуют моменту времени $t_0 = \pi / \omega_0 = 0,017$ с, при котором достигается максимум функции (4.13) при частоте основного тона ω_0 . При вычислении перемещений по формулам (2.1) суммировались первые пять членов ряда. При росте радиуса пятна нагрузки в 2 раза перемещения увеличивались примерно на 57–67%.

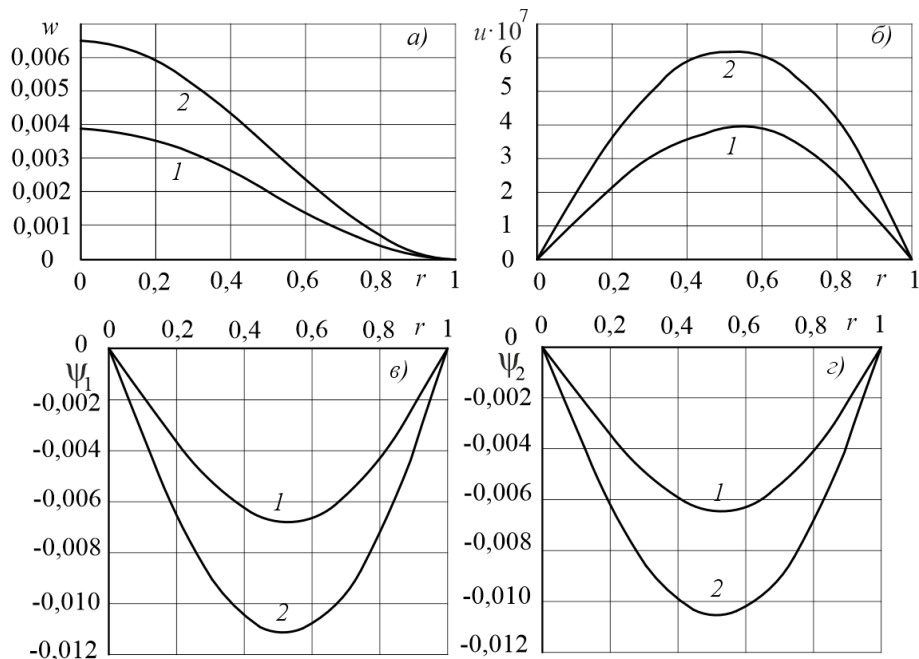


Рисунок 3.1. – Изменение перемещений при мгновенном приложении нагрузки: 1 – $b = 0,5$, 2 – $b = 1$

Заключение

Разработанная механико-математическая модель вынужденных колебаний круговой несимметричной по толщине пятислойной пластины при локальных мгновенно приложенных нагрузках позволяет исследовать ее параметры динамического деформирования в зависимости от геометрических размеров, упругих свойств материалов слоев и размеров пятна нагрузки. Полученные результаты могут быть использованы в расчетной практике машиностроительных предприятий и транспортных комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhuravkov, M. Mechanics of Solid Deformable Body / M. Zhuravkov, Y. Lyu, E. Starovoitov. – Singapore : Springer Verlag, 2023. – 317 p. – DOI: 10.1007/978-981-19-8410-5.
2. *Deformation of Three-layer Structural Elements in Thermal Radiation Fields : monograph* / E. Starovoitov, M. Zhuravkov, D. Leonenko, Y. Lyu. – Singapore : Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2024. – 386 p. – DOI: 10.1007/978-981-97-7217-9.
3. Абдусаттаров, А. Деформирование и повреждаемость упругопластических элементов конструкций при циклических нагружениях / А. Абдусаттаров, Э. И. Старовойтов, Н. Б. Рузиева. – Ташкент : «IDEAL PRESS», 2023. – 381 с.
4. *Деформирование трехслойных пластин при термосиловых нагрузках* / Э. И. Старовойтов, Ю. В. Шафиева, А. В. Нестерович, А. Г. Козел. – Гомель : БелГУТ, 2024. – 395 с.
5. Aghalovyan, L. Asymptotic theory of anisotropic plates and shells / L. Aghalovyan. – Singapore – London : World Scientific Publishing, 2015. – 376 p.
6. Старовойтов, Э. И. Сопротивление материалов / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2004. – 376 с.
7. Старовойтов, Э. И. Механика материалов / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 380 с.
8. Старовойтов, Э. И. Сопротивление материалов / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2025. – 396 с.
9. Старовойтов, Э. И. Упругопластическое деформирование трехслойных стержней в температурном поле / Э. И. Старовойтов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2012. – № 3. – С. 91–98.
10. Старовойтов, Э. И. Деформирование трехслойного стержня в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – Т. 22, № 1. – С. 31–35.
11. Старовойтов, Э. И. Изгиб прямоугольной трехслойной пластины на упругом основании / Э. И. Старовойтов, Е. П. Доровская // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2006. – № 3. – С. 45–50.
12. Старовойтов, Э. И. Изгиб упругой круговой трехслойной пластины на основании Пастернака / Э. И. Старовойтов, А. Г. Козел // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 392–406.
13. Козел, А. Г. Термоупругий изгиб круговой трехслойной пластины, связанной с основанием Пастернака / А. Г. Козел // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2 (51). – С. 31–37. – DOI: 10.54341/20778708_2022_2_51_31. – EDN: QSYVXB.
14. *A comparison of bending properties for cellular core sandwich panels* / L. Yang, O. Harrysson, H. West, D. Cormier // Materials Sciences and Applications. – 2013. – Vol. 4, № 8. – P. 471–477. – DOI: 10.4236/msa.2013.48057.
15. Захарчук, Ю. В. Деформирование круговой трехслойной пластины со сжимаемым заполнителем / Ю. В. Захарчук // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 4 (33). – С. 53–57. – EDN: ZXPDPH.
16. Нестерович, А. В. Осесимметричное нагружение круглой физически нелинейной трехслойной пластины в своей плоскости / А. В. Нестерович // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 3 (48). – С. 24–29. – DOI: 10.54341/20778708_2021_3_48_24. – EDN: KOMJLC.
17. Салицкий, В. С. Изгиб локальной нагрузкой круглой пятислойной пластины / В. С. Салицкий // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 3 (60). – С. 27–31. – DOI: 10.54341/20778708_2024_3_60_27. – EDN: APZZLI.
18. Bakulin, V. N. Parametric resonance of a three layered cylindrical composite rib-stiffened shell / V. N. Bakulin, D. A. Boitsova, A. Ya. Nedbai // Mechanics of composite materials. – 2021. – Vol. 57, № 5. – P. 623–634. – DOI: 10.1007/s11029-021-09984-9.
19. Tarlakovskii, D. V. Two-Dimensional Non-stationary Contact of Elastic Cylindrical or Spherical Shells / D. V. Tarlakovskii, G. V. Fedotenkov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – Vol. 43, № 2. – P. 145–152. – DOI: 10.3103/S1052618814010178.
20. Suvorov, Ye. M. The plane problem of the impact of a rigid body on a half-space modelled by a Cosserat medium / Ye. M. Suvorov, D. V. Tarlakovskii, G. V. Fedotenkov // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2012. – Vol. 76, № 5. – P. 511–518. – DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2012.11.015.
21. Leonenko, D. V. Vibrations of Cylindrical Sandwich Shells with Elastic Core Under Local Loads / D. V. Leonenko, E. I. Starovoitov // International Applied Mechanics. – 2016. – Vol. 52, № 4. – P. 359–367. – DOI: 10.1007/s10778-016-0760-8. – EDN: YVTYID.
22. Pradhan, M. Static and dynamic stability analysis of an asymmetric sandwich beam resting on a variable Pasternak foundation subjected to thermal gradient / M. Pradhan, P. R. Dash, P. K. Pradhan //

Mechanica. – 2016. – Vol. 51, № 3. – P. 725–739. – DOI: 10.1007/s11012-015-0229-6.

23. Будникова, Д. А. Собственные частоты колебаний пятислойного стержня / Д. А. Будникова // Проблемы физики, математики и техники. – 2025. – № 2 (63). – С. 11–15. – DOI: 10.54341/20778708_2025_2_63_11. – EDN: AXVKJG.

24. Лачугина, Е. А. Поперечные колебания пятислойной упругой круговой пластины с жестким наполнителем / Е. А. Лачугина // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – № 15. – С. 116–122. – EDN: FXBAGR.

25. Лачугина, Е. А. Частоты собственных колебаний пятислойной круговой пластины / Е. А. Лачугина // Теоретическая и прикладная механика : Международный научно-технический сборник. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2023. – С. 227–233. – EDN: NXPOEL.

26. Лачугина, Е. А. Свободные колебания пятислойной круговой пластины с легкими заполнителями / Е. А. Лачугина // Механика. Исследования и инновации. – 2023. – № 16. – С. 111–116. – EDN: RCCKPM.

27. Лачугина, Е. А. Собственные частоты колебаний круговой пятислойной несимметричной по толщине пластины / Е. А. Лачугина //

Механика. Исследования и инновации. – 2024. – № 17. – С. 92–99. – EDN: REQQPS.

28. Лачугина, Е. А. Собственные колебания пятислойной круговой пластины при различных закреплениях контура / Е. А. Лачугина // Проблемы физики, математики и техники. – 2025. – № 1 (62). – С. 25–30. – DOI: 10.54341/20778708_2025_1_62_25. – EDN: WGDTRR.

29. Lachugina, E. Natural fluctuations of a five-layer thickness unsymmetrical plate / E. Lachugina // AIP Conference Proceedings. – 3 April 2025. – Vol. 3265, iss. 1. – P. 050005. – DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0265256>.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № T24M-004).

Поступила в редакцию 04.02.2026.

Информация об авторах

Лачугина Екатерина Андреевна – аспирант