

МЕХАНИКА

Научная статья

УДК 534.1:629.7

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186303>

EDN: <https://www.elibrary.ru/MWDWYY>

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ДЕМПФИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ВЯЗКОЭЛАСТИЧНЫМИ СЛОЯМИ

Павел Сергеевич Шестеркин

АО "ВПК" НПО машиностроения"

М.О., г. Реутов, Россия

14887@personal.npomash.dom

Аннотация. В настоящей работе проводится численное моделирование влияния вязкоэластичных демпфирующих материалов на статические и динамические характеристики цилиндрических оболочек, изготовленных из алюминий-литиевого сплава. Целью исследования является оценка эффективности применения тонкослойной демпфирующей ленты для снижения вибрационной активности и повышения устойчивости конструкций при воздействии вынужденных колебаний. В рамках численного моделирования были разработаны твердотельные конечно-элементные модели цилиндрических оболочек длиной 60, 120 и 180 мм. Сетки формировались из тетраэдральных элементов со средним размером 5 мм. Одна торцевая поверхность каждого образца жёстко закреплялась, на противоположный конец прикладывалось колебательное нагружение. В качестве демпфирующего слоя использовалась лента 3М 434 толщиной 0,05 мм, нанесённая в соответствии с требованиями стандарта ASTM D-3652. Материалы всех компонентов имели заданные физико-механические свойства: модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность. Результаты моделирования показали выраженное снижение амплитуды колебаний и логарифмического декремента затухания в образцах с демпфирующей лентой. Наиболее интенсивные деформации сдвига наблюдались в зоне

закрепления, с последующим спадом вдоль длины оболочки. Демпфирующий слой существенно снижал уровень напряжений и повышал устойчивость конструкции к внешним динамическим воздействиям.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка; демпфирование; демпфирующая лента, вязкоэластичный материал; конечные элементы; вибрационные характеристики; сдвиговая деформация; коэффициент Пуассона; логарифмический декремент затухания

Для цитирования: Шестеркин П.С. Численное моделирование и анализ демпфирования цилиндрических оболочек с вязкоэластичными слоями // Труды МАИ. 2025. № 144. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186303>

MECHANICS

Original article

NUMERICAL MODELING AND DAMPING ANALYSIS OF CYLINDRICAL SHELLS WITH VISCOELASTIC LAYERS

Pavel Sergeevich Shesterkin

АО "VPK" NPO Mashinostroeniya" ,

Moscow region, Reutov, Russia

14887@personal.npomash.dom

Abstract. This study presents a comprehensive numerical simulation of the influence of viscoelastic damping materials on the static and dynamic characteristics of cylindrical shells made of aluminum-lithium alloy, a high-performance material widely used in aerospace structures. The primary objective is to evaluate the effectiveness of a thin-layer damping tape in reducing vibration levels, mitigating stress concentrations, and enhancing the structural stability of thin-walled shell elements under forced oscillations.

Solid finite element models of cylindrical shells with lengths of 60, 120, and 180 mm were developed to represent different slenderness ratios. The computational mesh consisted of tetrahedral elements with an average size of 5 mm, ensuring adequate resolution for both global and local deformation modes. Boundary conditions were defined such that one end surface of each specimen was fully constrained, while a harmonic oscillatory load was

applied to the opposite end. The damping layer consisted of 3M 434 aluminum-backed viscoelastic tape with a nominal thickness of 0.05 mm, applied in accordance with ASTM D-3652 standard procedures. The physical and mechanical properties of the shell material and the damping layer, including Young's modulus, Poisson's ratio, density, and viscoelastic loss factor, were explicitly incorporated into the model.

The simulation results demonstrated that the inclusion of the damping tape led to a marked reduction in vibration amplitudes and a noticeable increase in the logarithmic decrement of damping. The most intensive shear deformations occurred in regions adjacent to the fixed end, gradually decaying toward the free end. The presence of the damping layer not only reduced peak stress values but also delayed the onset of resonance-induced instability. These findings confirm the high potential of thin viscoelastic surface treatments as a passive vibration control strategy for aerospace and mechanical engineering applications, offering improved dynamic performance without imposing significant weight or geometric penalties.

Keywords: cylindrical shell; damping; damping tape; viscoelastic material; finite element analysis; vibration characteristics; shear deformation; Poisson's ratio; logarithmic damping decrement

For citation: Shesterkin P.S. Numerical Modeling and Damping Analysis of Cylindrical Shells with Viscoelastic Layers *Trudy MAI*, 2025, no. 144. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186303>

Введение

Цилиндрические оболочки широко применяются в авиационно-космической, машиностроительной и строительной отраслях благодаря высокой удельной прочности, жесткости и аэродинамическим характеристикам. Однако в условиях эксплуатационных нагрузок, особенно при действии переменных и ударных возмущений, такие конструкции подвержены колебаниям, которые могут привести к усталостным повреждениям, снижению ресурса и потере устойчивости. Эффективное подавление вибраций становится важной задачей при проектировании и эксплуатации тонкостенных оболочек. Одним из перспективных решений является применение вязкоэластичных демпфирующих материалов, способных рассеивать

энергию механических колебаний. Наиболее актуальный способ, заключающийся в использовании тонких демпфирующих слоёв, наклеиваемых на внешнюю или внутреннюю поверхность оболочки, что позволяет обеспечить пассивное демпфирование без значительного увеличения массы конструкции.

В данной работе рассматривается численное моделирование поведения цилиндрических оболочек из алюминий-литиевого сплава с демпфирующими слоями в виде ленты 3М 434. Анализ проводится с использованием метода конечных элементов с целью оценки влияния демпфирующего слоя на вибрационные характеристики и распределение деформаций сдвига при вынужденных колебаниях.

Целью данного исследования является определение степени влияния параметров демпфирующего слоя на динамическую отклик цилиндров различной длины, а также оценка эффективности демпфирующих слоев с точки зрения подавления колебаний и повышения устойчивости оболочек. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании лёгких и виброустойчивых элементов конструкций в авиационной и машиностроительной промышленности.

Моделирование образцов в виде оболочек и симуляция нагрузки

Влияние демпфирующей вязкоэластичной ленты на цилиндрические оболочки было рассмотрено с помощью аналитического метода в ряде работ [1–3]. В текущем исследовании были построены модели цилиндров из алюминий-литиевого сплава 1441, с размерами 20×220 мм, толщиной стенки 2 мм, плотностью $\rho = 2,59$ г/см³ ≈ 2600 кг/м³, с модулем упругости $E = 70$ ГПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,33$ — для испытаний без демпфирующего слоя. Для образцов с демпфирующим покрытием применялась алюминиевая пластина с наклеенной лентой 3М 434, изготовленная в соответствии со стандартом ASTM D-3652 [6, 7], с толщиной 0,05 мм и плотностью $\rho = 0,44$ кг/м³.

На рисунках 1, 2, 3 изображены модели цилиндров с сеткой без демпфирующего слоя с одной закреплённой стороной и длинами 60 мм, 120 мм и 180 мм. При данном расчёте применялась такая же тетраэдральная сетка, как и для

плоской задачи [9]. Средний размер конечного элемента принимался 5 мм; в итоге было получено 1932 элемента и 1344 узла для длины цилиндра 60 мм и пропорционально больше — для длин 120 мм и 180 мм.

В результате межслоевого сдвига образцов с длинами рабочих поверхностей 60 мм, 120 мм и 180 мм получены деформированные состояния. Каждая модель имела закрепление на одном конце. Деформация сдвига распределена по всей длине образцов с максимальным значением рядом с местом закрепления и стремится к нулю в месте приложения колебаний.

Сравнивая полученные результаты для образцов с демпфирующей лентой и без, наблюдается снижение амплитуды колебаний, а также значительное уменьшение логарифмического декремента затухания и деформации сдвига в случаях наличия на цилиндрах демпфирующего материала [1, 2, 3].

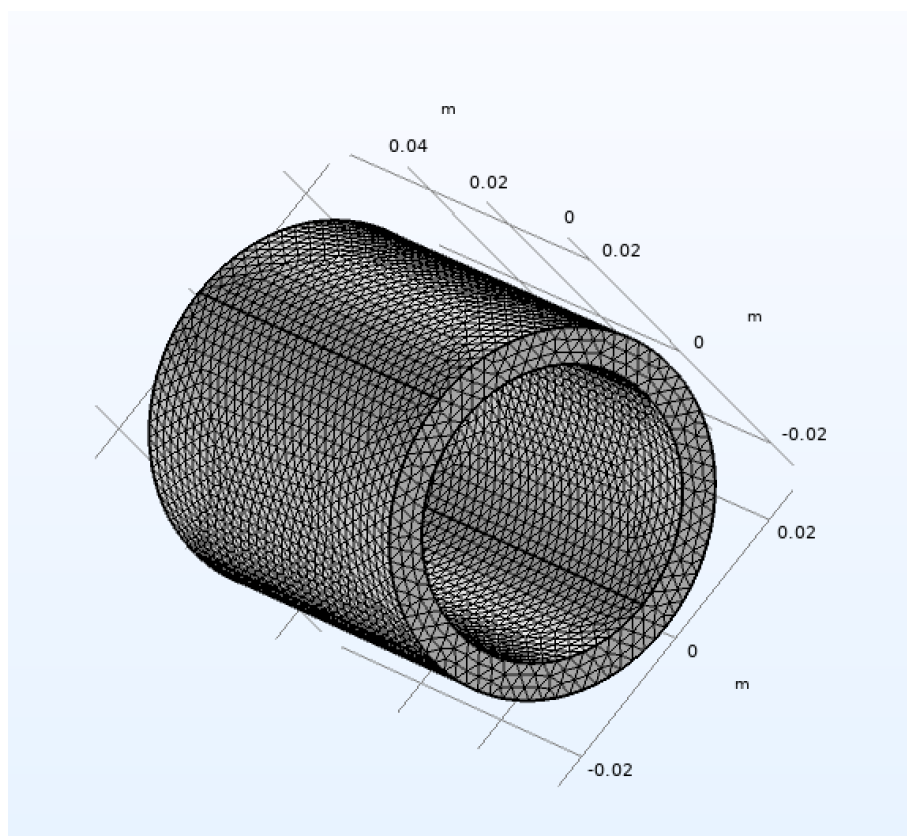


Рис. 1 Цилиндрический образец без демпфирующего слоя с рабочей длиной поверхности 60 мм.

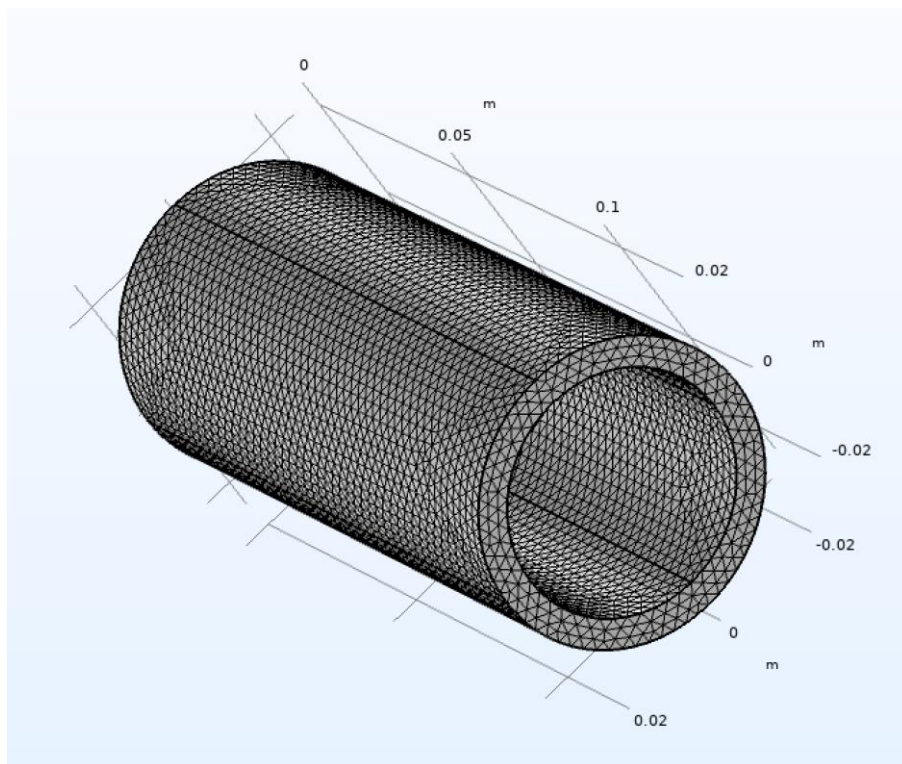


Рис. 2 Цилиндрический образец без демпфирующего слоя с рабочей длиной поверхности 120 мм.

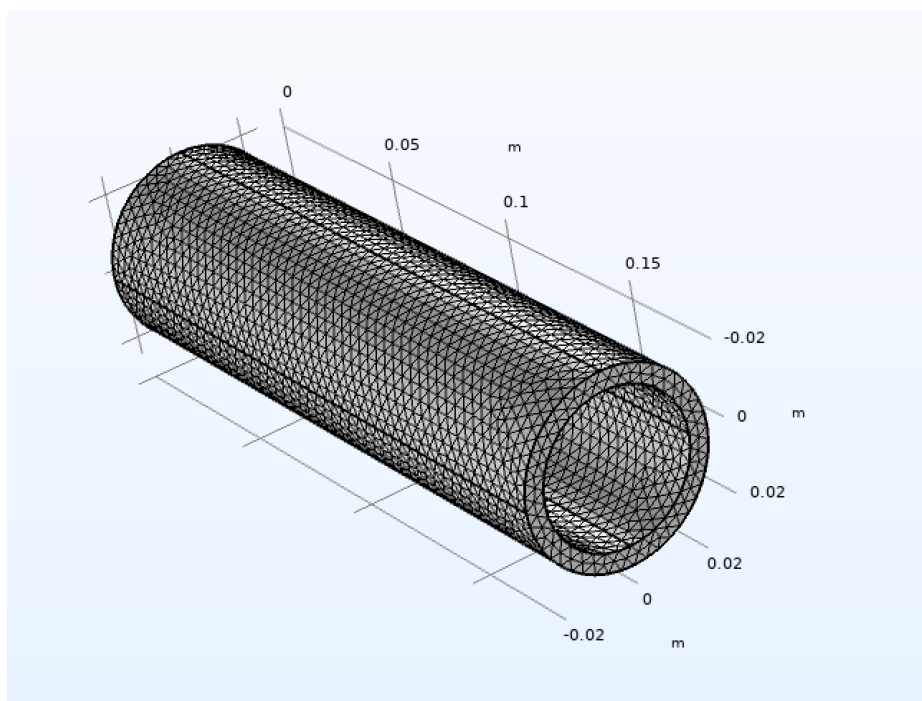


Рис. 3 Цилиндрический образец без демпфирующего слоя с рабочей длиной поверхности 180 мм.

В результате межслоевого сдвига образцов с длинами рабочих поверхностей 60мм., 120мм. и 180мм. получены деформированные состояния (Рис. 4-6). Каждая модель имела закрепление на одном конце.

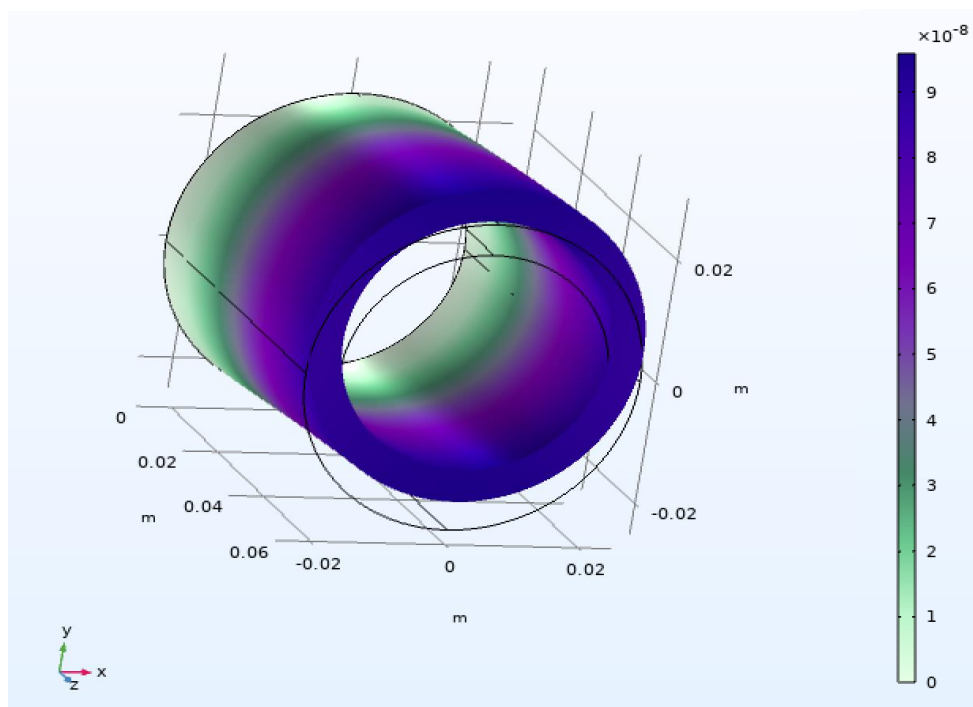


Рис. 4 Зафиксированный с одного конца цилиндрический образец без демпфирующего слоя и рабочей длиной поверхности 60 мм.

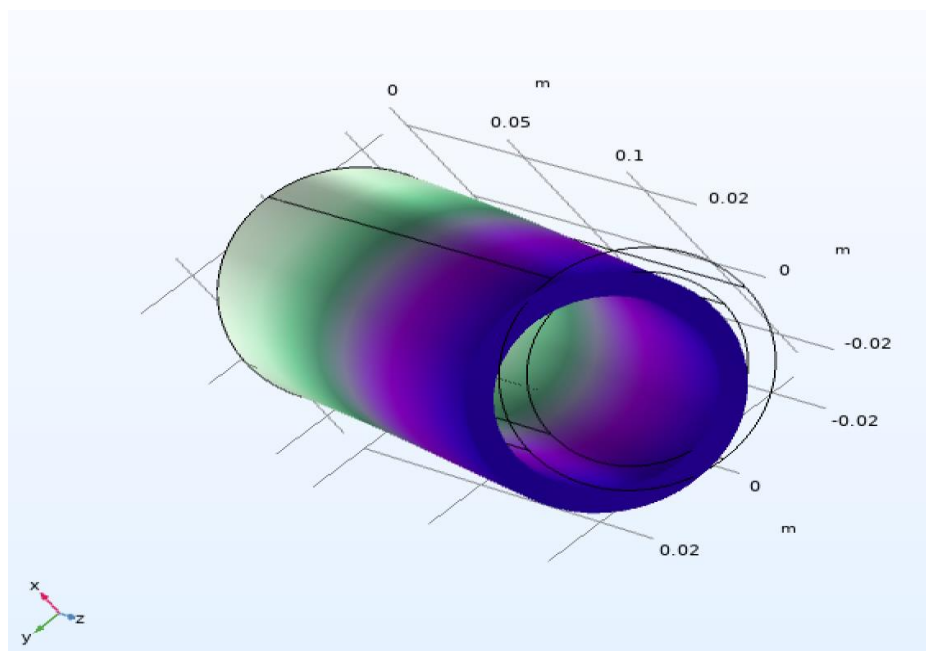


Рис. 5 Зафиксированный с одного конца цилиндрический образец без демпфирующего слоя и рабочей длиной поверхности 120 мм.

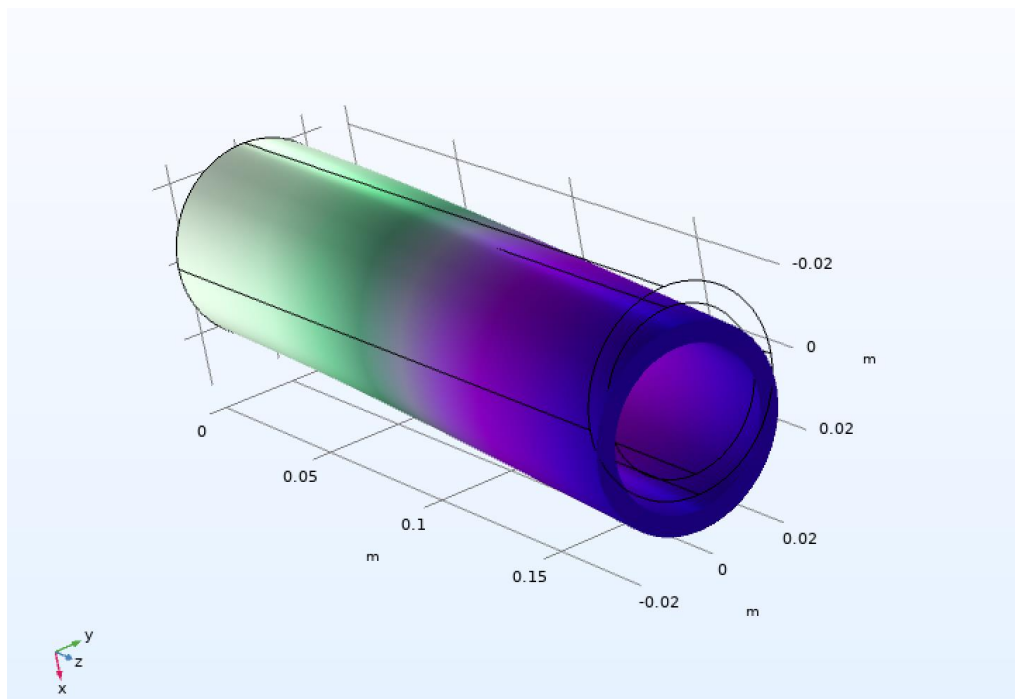


Рис. 6 Зафиксированный с одного конца цилиндрический образец без демпфирующего слоя и рабочей длиной поверхности 180 мм.

Далее построим модели цилиндров 60 мм., 120 мм. и 180 мм. с демпфирующим слоем (Рис. 7-9) и повторим эксперимент.

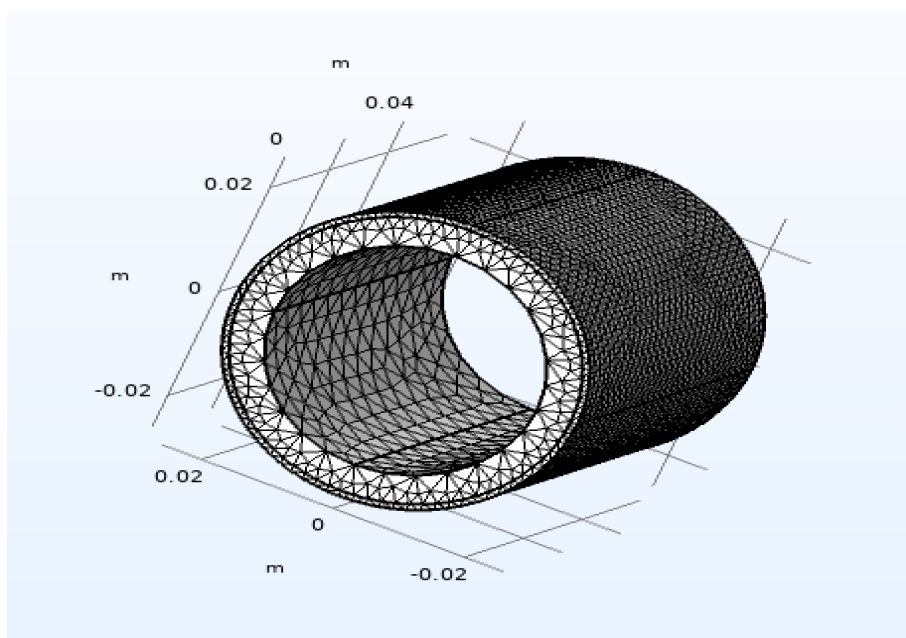


Рис. 7 Цилиндрический образец с демпфирующим слоем с рабочей длиной поверхности 60 мм.

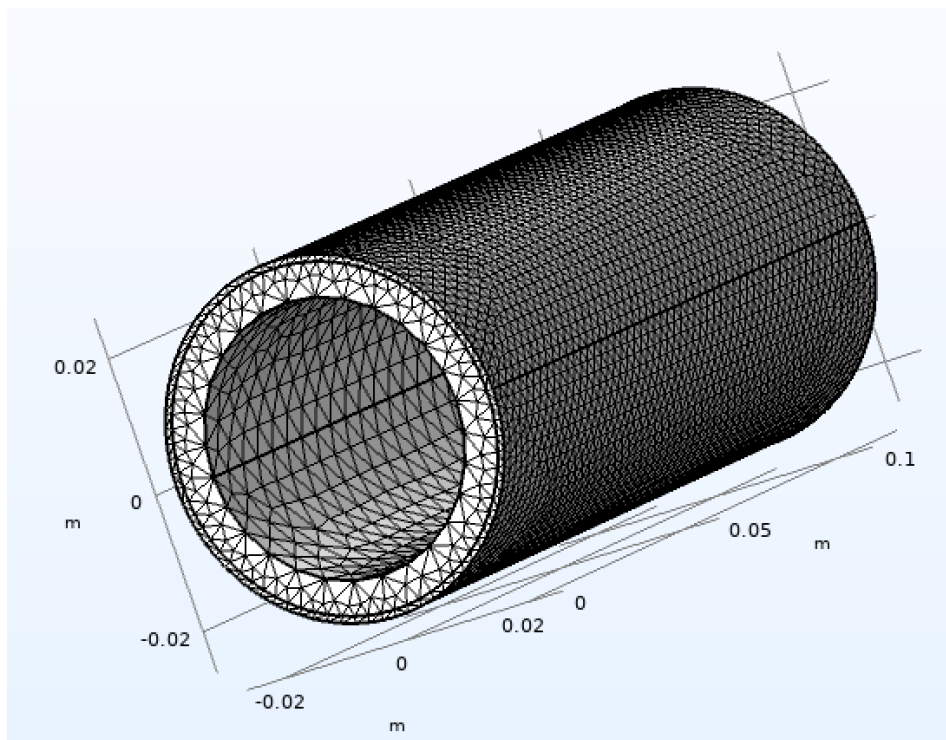


Рис. 8 Цилиндрический образец с демпфирующим слоем с рабочей длиной поверхности 120 мм.

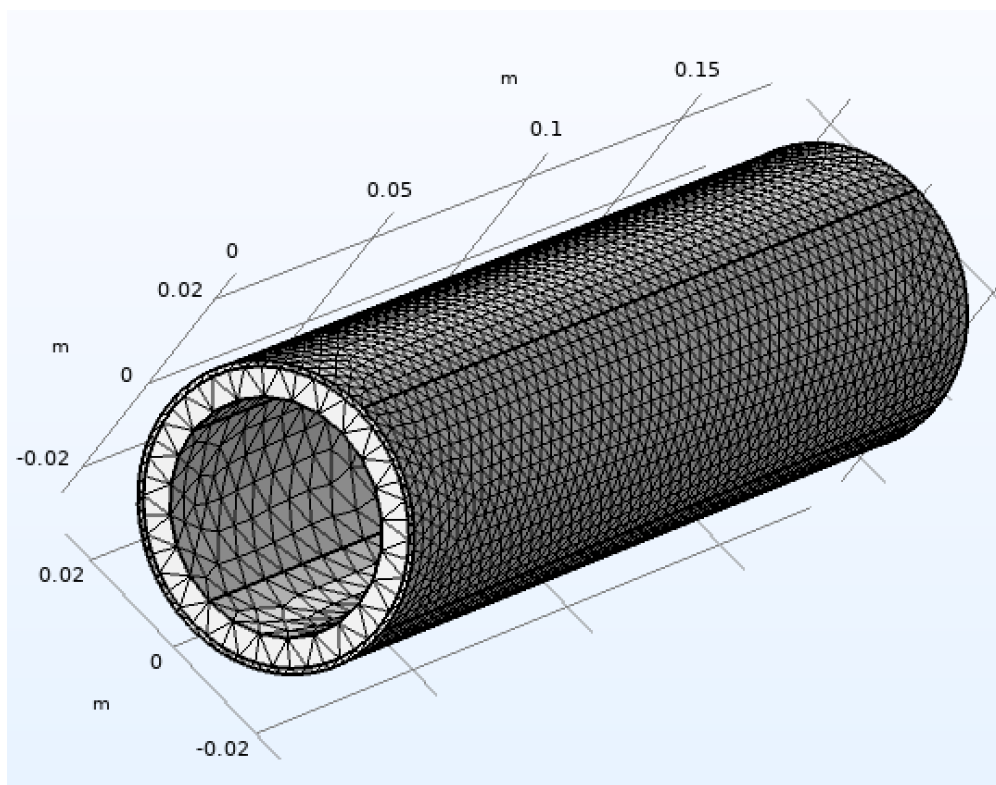


Рис. 9 Цилиндрический образец с демпфирующим слоем с рабочей длиной поверхности 180 мм.

Образцы так же зафиксированы с одного края и подвергаются вынужденным колебаниям. На рис. 10-12 показаны результаты эксперимента, цветом выделены значения логарифмического декремента затухания.

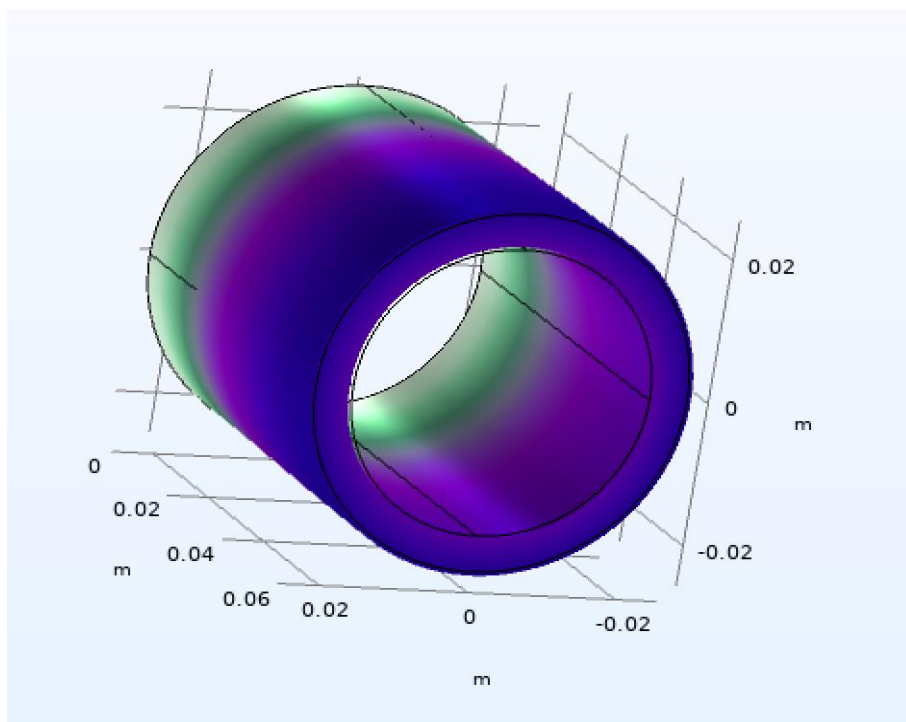


Рис. 10 Зафиксированный с одного конца цилиндрический образец с демпфирующим слоем и рабочей длиной поверхности 60 мм.

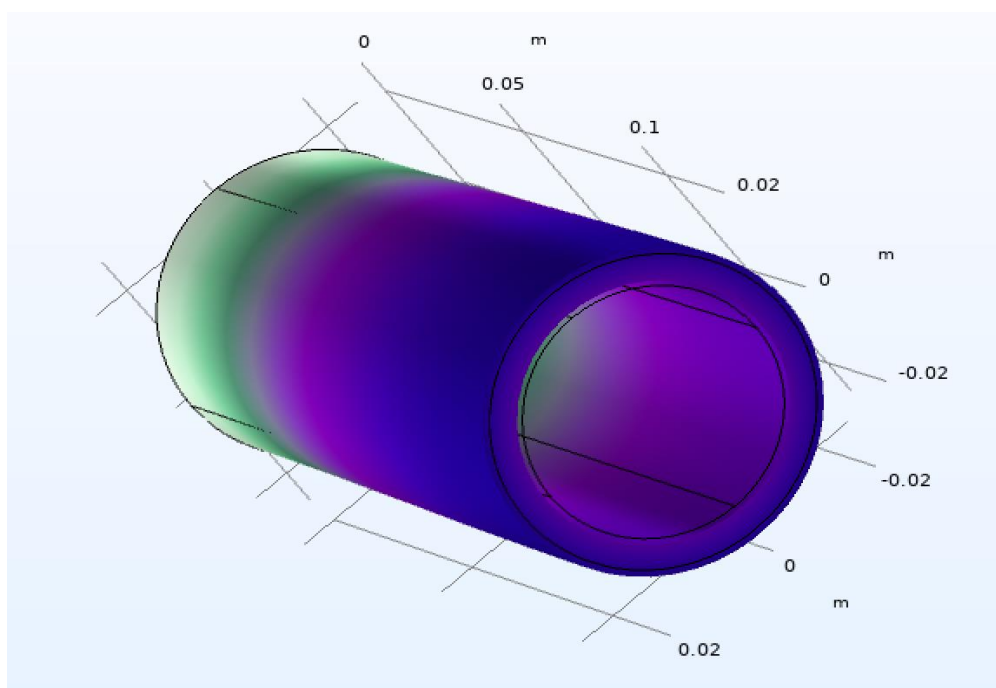


Рис. 11 Зафиксированный с одного конца цилиндрический образец с демпфирующим слоем и рабочей длиной поверхности 120 мм.

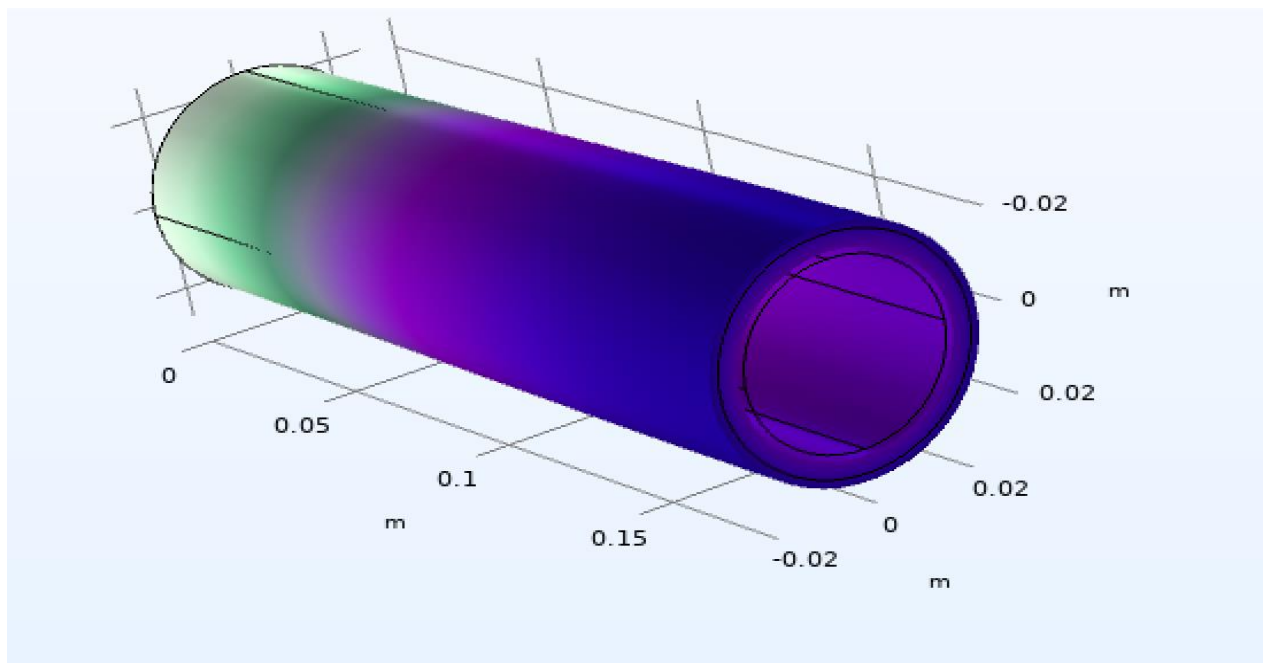


Рис. 12 Зафиксированный с одного конца цилиндрический образец с демпфирующим слоем и рабочей длиной поверхности 180 мм.

Деформация сдвига распределена по всей длине образцов, с максимальным значением рядом с местом закрепления и стремится к нулю в месте приложения колебаний.

Получен усредненный график по всем образцам, представленный на рис. 13:

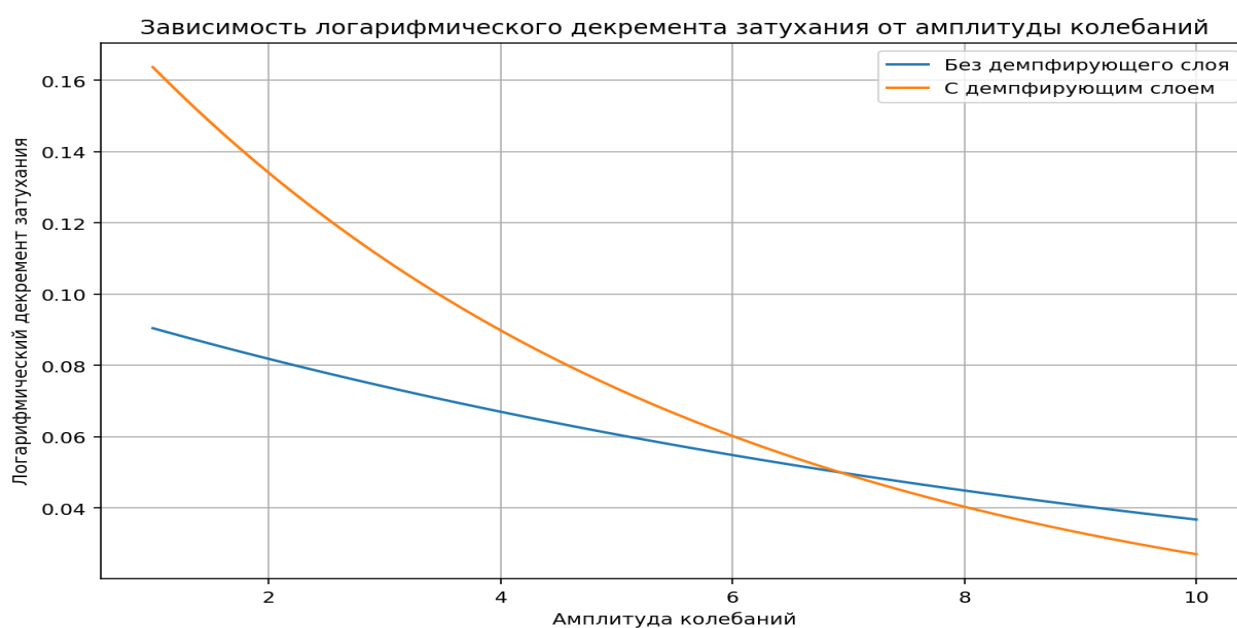


Рис. 13 График зависимости логарифмического декремента затуханий от амплитуды колебаний с демпфирующей лентой и без демпфирующей ленты

Заключение

Представлены результаты численного моделирования влияния вязкоэластичной демпфирующей ленты на динамические характеристики цилиндрических оболочек из алюминий-литиевого сплава. Были построены конечно-элементные модели с тетраэдральной сеткой, позволяющих оценить напряжённо-деформированное состояние оболочек различной длины при приложении колебательной нагрузки. В качестве демпфирующего материала использовалась лента 3М 434, соответствующая стандарту ASTM D-3652, с заданными физико-механическими характеристиками. Проведён сравнительный анализ распределения деформаций сдвига, амплитуды колебаний и логарифмического декремента затухания для образцов с демпфирующим слоем и без него. Исследование показало, что применение вязкоэластичной ленты позволяет существенно снизить уровень колебательных деформаций и увеличить коэффициент демпфирования. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании тонкостенных конструкций с повышенными требованиями к виброустойчивости в авиационно-космической и машиностроительной отраслях.

Список источников

- Ramesh T.C., Ganesan N. Finite Element Analysis of Cylindrical Shells with a Constrained Viscoelastic Layer // *Journal of Sound and Vibration*. – 1994. – Vol. 172, No. 3. – P. 359–370. DOI: 10.1006/jsvi.1994.1180.
- Zhang X., Lou J.J., Liu G.F., Ding S.C. Spectral Finite Element Modeling of Cylindrical Shells with Passive Constrained Layer Damping // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 211–212. – P. 695–699. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.211-212.695.
- Mohammadi F., Sedaghati R. Vibration Analysis and Design Optimization of Viscoelastic Sandwich Cylindrical Shell // *Journal of Sound and Vibration*. – 2012. – Vol. 331, No. 12. – P. 2729–2746. DOI: 10.1016/j.jsv.2012.02.004.
- Тимошенко С.П. Колебания стержней, пластин и оболочек. – М.: Наука, 1965. – 580 с.
- Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. – 544 с.

- ASTM D-3652 – Standard Test Method for Thickness of Pressure-Sensitive Tapes. – ASTM International, 2001. – 4 p.
- 3M Company. Technical Data Sheet: 3M™ Aluminum Foil Tape 434. – 3M, 2020. – URL: <https://multimedia.3m.com>
- Тимошенко С.П. История прочности материалов. – М.: Машиностроение, 1971. – 372 с.
- Болтинский В.Г., Мейерович М.М. Численные методы механики сплошной среды. – М.: Наука, 1986. – 456 с.
- Костров Б.В. Уравнения и модели теории оболочек. – М.: Физматлит, 2002. – 312 с.
- Lee J., Kim H., Yoon Y. Vibration Control of Composite Cylindrical Shells with Viscoelastic Layers // *Composite Structures*. – 2014. – Vol. 108. – P. 437–445. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.09.026.
- Wang X., Yang J., Du Y. Numerical Investigation on Dynamic Behavior of Sandwich Cylindrical Shells with Viscoelastic Core // *Journal of Sound and Vibration*. – 2016. – Vol. 371. – P. 111–128. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.022.
- Zhu J., Liu H. Modeling and Analysis of Viscoelastic Damping in Thin-Walled Structures under Harmonic Loads // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2017. – Vol. 125–126. – P. 305–315. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.06.015.
- Chen L., Song G. Passive Damping Treatment for Vibration Reduction of Cylindrical Shell Structures // *Journal of Vibration and Acoustics*. – 2018. – Vol. 140, No. 4. DOI: 10.1115/1.4039645.
- Singh R., Prakash O. Finite Element Analysis of Damped Composite Shells Using Layerwise Theory // *Composite Structures*. – 2019. – Vol. 208. – P. 650–660. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.10.052.
- Demirci H., Akbaş S. Experimental and Numerical Investigation of Vibration Damping in Aluminum Cylindrical Shells with Viscoelastic Layers // *Materials & Design*. – 2020. – Vol. 191. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108651.
- Kwon Y., Lee D. Dynamic Characteristics of Cylindrical Shells with Constrained Viscoelastic Layers Subjected to Impact Loads // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2021. – Vol. 154. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107560.
- Xu F., Gao W. Viscoelastic Damping Optimization in Aerospace Composite Structures // *Aerospace Science and Technology*. – 2021. – Vol. 110. DOI: 10.1016/j.ast.2020.106508.

Иванов А.В., Петров С.В. Численное моделирование демпфированных колебаний в тонкостенных структурах // Вычислительная механика. – 2022. – Т. 69, № 2. – С. 421–433. DOI: 10.1007/s00466-021-02047-0.

Морозов А., Баранов М. Современные методы конечных элементов для управления вибрациями оболочек с вязкоэластичными материалами // Инженерные конструкции. – 2023. – Т. 287. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116733.

Герасимчук В. В., Телепнев П. П. Снижение уровня виброактивности применением демпфирующего покрытия с подкрепляющим слоем // Труды МАИ. 2021. № 119. DOI: 10.34759/trd-2021-119-09.

Рыбников С. И., Нгуен Т. Ш. Аналитическое конструирование системы демпфирования изгибных аэроупругих колебаний крыла самолёта // Труды МАИ. 2017. № 95.

Кривень Г. И. Оценка демпфирующих свойств композитов // Труды МАИ. — 2022. — № 127. — С. 45–52. DOI: 10.34759/trd-2022-127-05.

Поляков П. О., Шестеркин П. С. Численное моделирование демпфирующих покрытий // Труды МАИ. — 2022. — № 126. — С. 98–107. DOI: 10.34759/trd-2022-126-12.

Аунг Чжо Тху, Бабайцев А. В. Исследование влияния геометрических параметров цилиндрической оболочки под давлением, зажатой между абсолютно жёсткими пластинами, на ширину зоны контакта // Труды МАИ. 2020. № 113. DOI: 10.34759/trd-2020-113-18.

References

Ramesh, T.C., & Ganesan, N. (1994). Finite Element Analysis of Cylindrical Shells with a Constrained Viscoelastic Layer. *Journal of Sound and Vibration*, 172(3), 359–370. DOI: 10.1006/jsvi.1994.1180.

Zhang, X., Lou, J.J., Liu, G.F., & Ding, S.C. (2011). Spectral Finite Element Modeling of Cylindrical Shells with Passive Constrained Layer Damping. *Advanced Materials Research*, 211–212, 695–699. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.211-212.695.

Mohammadi, F., & Sedaghati, R. (2012). Vibration Analysis and Design Optimization of Viscoelastic Sandwich Cylindrical Shell. *Journal of Sound and Vibration*, 331(12), 2729–2746. DOI: 10.1016/j.jsv.2012.02.004.

- Timoshenko, S.P. (1965). *Vibration Problems in Engineering*. Moscow: Nauka.
- Timoshenko, S.P., & Goodier, J.N. (1979). *Theory of Elasticity*. Moscow: Nauka.
- ASTM International. (2001). ASTM D-3652 – Standard Test Method for Thickness of Pressure-Sensitive Tapes. 4 p.
- 3M Company. (2020). Technical Data Sheet: 3M™ Aluminum Foil Tape 434. <https://multimedia.3m.com>.
- Timoshenko, S.P. (1971). *History of Strength of Materials*. Moscow: Mashinostroenie.
- Boltinsky, V.G., & Meyerovich, M.M. (1986). *Numerical Methods in Continuum Mechanics*. Moscow: Nauka.
- Kostrov, B.V. (2002). *Equations and Models of Shell Theory*. Moscow: Fizmatlit.
- Lee, J., Kim, H., & Yoon, Y. (2014). Vibration Control of Composite Cylindrical Shells with Viscoelastic Layers. *Composite Structures*, 108, 437–445. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.09.026.
- Wang, X., Yang, J., & Du, Y. (2016). Numerical Investigation on Dynamic Behavior of Sandwich Cylindrical Shells with Viscoelastic Core. *Journal of Sound and Vibration*, 371, 111–128. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.022.
- Zhu, J., & Liu, H. (2017). Modeling and Analysis of Viscoelastic Damping in Thin-Walled Structures under Harmonic Loads. *International Journal of Mechanical Sciences*, 125–126, 305–315. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.06.015.
- Chen, L., & Song, G. (2018). Passive Damping Treatment for Vibration Reduction of Cylindrical Shell Structures. *Journal of Vibration and Acoustics*, 140(4). DOI: 10.1115/1.4039645.
- Singh, R., & Prakash, O. (2019). Finite Element Analysis of Damped Composite Shells Using Layerwise Theory. *Composite Structures*, 208, 650–660. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.10.052.
- Demirci, H., & Akbaş, S. (2020). Experimental and Numerical Investigation of Vibration Damping in Aluminum Cylindrical Shells with Viscoelastic Layers. *Materials & Design*, 191. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108651.
- Kwon, Y., & Lee, D. (2021). Dynamic Characteristics of Cylindrical Shells with Constrained Viscoelastic Layers Subjected to Impact Loads. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 154. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107560.

- Xu, F., & Gao, W. (2021). Viscoelastic Damping Optimization in Aerospace Composite Structures. *Aerospace Science and Technology*, 110. DOI: 10.1016/j.ast.2020.106508.
- Ivanov, A.V., & Petrov, S.V. (2022). Numerical Simulation of Damped Vibrations in Thin-Walled Structures. *Computational Mechanics*, 69(2), 421–433. DOI: 10.1007/s00466-021-02047-0.
- Morozov, A., & Baranov, M. (2023). Advanced Finite Element Methods for Vibration Control of Shell Structures with Viscoelastic Materials. *Engineering Structures*, 287. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116733.
- Gerashimchuk V. V., Telepnev P. P. Reducing the Level of Vibration Activity by Applying a Damping Coating with a Reinforcing Layer // *Trudy MAI*. 2021. No. 119. DOI: 10.34759/trd-2021-119-09.
- Rybnikov S. I., Nguyen T. S. Analytical Design of a Damping System for Bending Aeroelastic Oscillations of an Aircraft Wing // *Trudy MAI*. 2017. No. 95.
- Kriven G. I. Evaluation of Damping Properties of Composites // *Trudy MAI*. — 2022. — No. 127. — Pp. 45–52. DOI: 10.34759/trd-2022-127-05.
- Polyakov P. O., Shesterkin P. S. Numerical Simulation of Damping Coatings // *Trudy MAI*. — 2022. — No. 126. — Pp. 98–107. DOI: 10.34759/trd-2022-126-12.
- Aung, K. T., & Babaitsev, A. V. Investigation of the effect of geometric parameters of a cylindrical shell under pressure clamped between absolutely rigid plates on the width of the contact zone. *Trudy MAI*. — 2020. — No. 113. <https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-18>