

Труды МАИ. 2023. № 128
Trudy MAI, 2023, no. 128

Научная статья
УДК 539.3:534.1
DOI: [10.34759/trd-2023-128-04](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-04)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССОЙ С УЧЕТОМ РАСТЯЖЕНИЯ КОНТУРА

Артем Юрьевич Добрышкин¹✉, Иван Владимирович Лозовский²,
Олег Евгеньевич Сысоев³, Евгений Олегович Сысоев⁴

^{1,2,3,4}Комсомольский-на-Амуре государственный университет,

Комсомольск-на-Амуре, Россия

¹wwwartem21@mail.ru✉

Аннотация. Увеличение роли товарооборота в мировой экономике является, на сегодня, объективным фактом. Повышение роли средств доставки по воздуху и за пределы Земли требует и совершенствования качества летательных аппаратов, в основу которых легли оболочки. Оболочки обладают неоспоримыми преимуществами, а именно: прочностью, герметичностью, обтекаемостью, перед другими вариантами конструктивных схем. Эти оболочки в процессе эксплуатации подвергаются различным нагрузкам: ветровым, переменному атмосферному давлению, температурным нагрузкам, нагрузкам от инженерных систем жизнеобеспечения человека. По этой причине для изготовления этих оболочек используются легкие и прочные

конструкционные материалы. Одним из самых часто используемых материалов является алюминий. Он обладает рядом преимуществ: низкая плотность при значительной прочности, долговечность, стойкость к многим видам воздействий. По причине ограниченности в выборе материала для производства летательных аппаратов, исследователи ищут другие варианты повышения прочности и надежности конструкций. Например, изучение внутренних механизмов движения или уточнение расчетной модели. Например, существует проблема присутствия вынужденных и собственных колебаний в разомкнутых тонкостенных цилиндрических оболочках, которые возникают по причине циклического или квазистатического внешнего воздействия. Совмещение частот собственных и вынужденных колебаний может привести к недопустимым амплитудам колебательного процесса конструкции, что приведет к разрушению этих оболочек. На сегодняшний день анализ колебательного поведения конструкции при проектировании конструкций летательных аппаратов не проводится в связи с их относительно небольшими размерами, а также отсутствием соответствующих методик и аналитических моделей. Поэтому необходимо изучение различных аспектов колебаний конструкций и, в частности, влияния присоединенной массы на частотные характеристики колебательного процесса тонкостенных цилиндрических оболочек.

Ключевые слова: колебания, цилиндрические оболочки, присоединенная масса, растяжение контура, численное исследование, композитный материал

Финансирование: исследование выполнено в рамках научного проекта, финансируемого за счет средств КнАГУ № ВН 12/2022.

Для цитирования: Добрышкин А.Ю., Лозовский И.В., Сысоев О.Е., Сысоев Е.О. Исследование колебаний цилиндрической оболочки с присоединенной массой с учетом растяжения контура // Труды МАИ. 2023. №128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-04](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-04)

Original article

STUDY OF VIBRATIONS OF A CYLINDRICAL SHELL WITH ADDED MASS WITH CONSIDERATION OF CONTOUR EXTENSION

Artem Yu. Dobryshkin¹✉, Ivan V. Lozovsky²,

Oleg E. Sysoev³, Evgeny O. Sysoev⁴

^{1,2,3,4} Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

¹wwwartem21@mail.ru✉

Abstract. As of today, the commodities turnover role increase in the global economy is an objective factor. The role of aerial delivery vehicles and outwards the Earth increasing requires the quality improvement of flying vehicles, which basis is formed by the shells. The shells demonstrate indisputable advantages, namely strength, tightness and streamlining over the other options of structural schemes. In operation, these shells are being subjected to various loadings, such as wind load, varying atmospheric pressure, temperature loads, and loads of engineering systems for human life support. For this reason, light and strong structural materials are used for these shells manufacturing. One of the most commonly used materials is

aluminum. It has a number of advantages such as low density at significant strength, durability, resistance to many types of impacts. Due to the limited choice of material for the aircraft production, researchers are searching for other options to improve the structures strength and reliability. For example, the study of internal mechanisms of movement or refinement of the computational model. As an example, there is the problem of the forced and natural oscillations presence in the open thin-walled cylindrical shells, which arise due to the cyclic or quasi-static external effects. Frequencies overlapping of both natural and forced vibrations may lead to unacceptable amplitudes of the structure oscillatory process, which will lead to these shells destruction. As of today, the oscillatory behavior analysis of the structure in the design of aircraft structures is not being performed due to their relatively small size, as well as the lack of appropriate techniques and analytical models. Thus, it is necessary to study various aspects of structural vibrations and, in particular, the effect of the added mass on the frequency characteristics of the oscillatory process of thin-walled cylindrical shells.

Keywords: vibrations, cylindrical shells, added mass, contour stretching, numerical study, composite material

Funding: the research was accomplished within the frameworks of the scientific project financed by the funds of the КХАГУ № BH 12/2022.

For citation: Dobryshkin A.Yu., Lozovsky I.V., Sysoev O.E., Sysoev E.O. Study of vibrations of a cylindrical shell with added mass with consideration of contour extension. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-04](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-04)

1. Введение

Увеличение роли товарооборота в мировой экономике является, на сегодня, объективным фактом. Повышение роли средств доставки по воздуху и за пределы земли требует и совершенствования качества летательных аппаратов, в основу которых легли оболочки. Оболочки обладают неоспоримыми преимуществами, а именно: прочностью, герметичностью, обтекаемостью, перед другими вариантами конструктивных схем. Эти оболочки в процессе эксплуатации подвергаются различным нагрузкам: ветровым, переменному атмосферному давлению, температурным нагрузкам, нагрузкам от инженерных систем жизнеобеспечения человека. По этой причине для изготовления этих оболочек используются легкие и прочные конструкционные материалы. Одним из самых часто используемых материалов является алюминий. Он обладает рядом преимуществ: низкая плотность при значительной прочности, долговечность, стойкость к многим видам воздействий. По причине ограниченности в выборе материала для производства летательных аппаратов, исследователи ищут другие варианты повышения прочности и надежности конструкций. Например, изучение внутренних механизмов движения или уточнение расчетной модели. Например, существует проблема присутствия вынужденных и собственных колебаний в разомкнутых тонкостенных цилиндрических оболочках, которые возникают по причине циклического или квазистатического внешнего воздействия[1-4]. Совмещение частот собственных и вынужденных колебаний может привести к недопустимым амплитудам колебательного процесса конструкции, что приведет к разрушению этих оболочек [5, 6]. На

сегодняшний день анализ колебательного поведения конструкции при проектировании конструкций летательных аппаратов не проводится в связи с их относительно небольшими размерами, а также отсутствием соответствующих методик и аналитических моделей. Поэтому необходимо изучение различных аспектов колебаний конструкций и, в частности, влияния присоединенной массы на частотные характеристики колебательного процесса тонкостенных цилиндрических оболочек.

2. Актуальность, научная значимость вопроса

Тонкостенные цилиндрические оболочки, замкнутой или разомкнутой формы, широко применяется в авиации и ракетостроении, где используется в качестве основы летательных аппаратов, то есть ограждающих конструкций, а так же ограждающих конструкций внутренних систем и оборудования, например, топливных баков. Использование тонкостенной оболочки в качестве покрытия имеет ряд преимуществ, с точки зрения экономики, когда оболочка может перекрыть большие пролёты без дополнительных опор создавая тем самым большие пространства, имеет прекрасное соотношение ограждающей поверхности (затрат) к внутреннему объёму. Но эта тонкостенная конструкция подвержена явлению резонанса от совпадения частот собственных и вынужденных колебаний, что приводит её разрушению. Как показывает практика, на сегодняшний день, процессы колебания оболочек в строительстве недостаточно изучены, и не мало аварий случилось из-за того, что во время проектирования не учитывались динамические воздействия от вынужденных

колебаний. Исследование колебательных процессов в разное время имело исключительный характер, так как в ходе испытаний по причине наступления резонанса могли выйти из строя детали и узлы, а это в свою очередь недопустимо [7-9].

Общеизвестное теоретическое решение математической модели для получения численных характеристик собственных колебаний цилиндрической оболочки с различного рода включениями показывают изменение частотных характеристик колебательного процесса, даже при стандартных условиях работы конструкции. Это происходит по причине изменения напряженно-деформируемого состояния в конструкции, изменения внутренних напряжений в процессе эксплуатации, что часто не учитывается в процессе проектирования. Различие показателей амплитудно-частотных характеристик между теоретическим и фактическим поведением оболочки увеличивается при наличии на оболочке начальных неправильностей в виде малых присоединенных масс, а именно при увеличении значений их масс, что указывает на существенное влияние на колебательный процесс данных включений. Учет включений в виде малых присоединенных масс при теоретических расчетах очень существенен, и не только по причине влияния инерционной составляющей данных включений, но по причине появления новых процессов в виде взаимодействия изгибного частотного спектра в процессе эксплуатации конструкций.

Исследования численных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек происходило на основе теории цилиндрических оболочек, описанных

системой дифференциальных уравнений [10-13] для определения частоты колебания тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек.

Во многих исследованиях численных колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек редко учитывают тонкостенную цилиндрическую оболочку как многослойную конструкцию, где можно выявить значимость усреднённого модуля упругости на процесс колебания тонкостенных цилиндрических оболочек и определить характер колебаний продольных полуволн тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек, принимаемых в расчет и круговой частоты колебаний оболочки.

3. Постановка задачи

В рамках курса уточнения расчетных моделей необходимо проводить дальнейшие исследования процессов колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек и разработать математическую модель [14-17], для расчета частотных характеристик вынужденных колебаний оболочки с малой присоединенной массой при проектировании оболочечных конструкций зданий и сооружений.

4. Теоретическая часть

Уравнение колебаний может быть получено из общей системы дифференциальных уравнений путем добавления к правой части дополнительной погонной силы инерции, обусловленной действием присоединенной массы на упругий скелет оболочки:

$$q(y, t) = \frac{F_{И}}{2\varepsilon} = q_0 + q_1 \sin\left(\frac{ny}{r}\right) + q_2 \cos\left(\frac{ny}{r}\right),$$

где $F_{И} = -M''$ – сосредоточенная сила инерции.

Тогда уравнение колебаний примет вид:

$$EJw^{IV} + \rho F \ddot{w} = \dots, t).$$

Прогиб кольца в точке сосредоточения массы представим в виде:

$$w_0 = f_0 + f_1 \sin\left(\frac{ny_0}{r}\right) + f_2 \cos\left(\frac{ny_0}{r}\right),$$

а в остальных точках кольца в виде:

$$w = f_0 + f_1 \sin\left(\frac{ny}{r}\right) + f_2 \cos\left(\frac{ny}{r}\right).$$

Упростив это выражение, получим квадратное уравнение относительно λ :

$$\lambda^2 - \lambda \left(2 + 2 \frac{M}{M+M_0} \right) + 2 \frac{M}{M+M_0} - 1 = 0.$$

Найдем корни этого уравнения:

$$\lambda_{1,2} = 1 + \frac{M}{M+M_0} \pm \sqrt{\left(1 + \frac{M}{M+M_0} \right)^2 - 2 \frac{M}{M+M_0} - 1}.$$

Вычислим каждый корень в отдельности:

$$\lambda_1 = 1 + \frac{M}{M+M_0} + \sqrt{1 + 2 \frac{M}{M+M_0} + \left(\frac{M}{M+M_0} \right)^2 - 2 \frac{M}{M+M_0} - 1} = 1 + 2 \frac{M}{M+M_0},$$

$$\lambda_2 = 1.$$

Делаем обратную подстановку:

$$1) \quad \frac{\omega_0^2}{\omega^2} = 1 + 2 \frac{M}{M+M_0}, \text{ тогда } \omega_1^2 = \frac{\omega_0^2}{1 + 2 \frac{M}{M+M_0}}, \text{ или } \theta_1^2 = \frac{1}{1 + \frac{2M}{M+M_0}};$$

$$2) \quad \frac{\omega_0^2}{\omega_2^2} = 1, \text{ тогда } \omega_2^2 = \omega_0^2, \text{ или } \theta_2^2 = 1;$$

где θ_1^2 и θ_2^2 - значения частот в безразмерном виде.

В результате получили частоты, одна из которых совпадает с собственной частотой колебаний, а другая отличается на определенное значение, зависящее от отношения масс.

5. Результаты

На рис. 1 представлены результаты теоретических расчетов, проведенных по предложенной математической модели расчета частоты колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек, построенных на основании величины присоединенной массы (график 1). Результаты теоретического расчета [18-20] частоты колебаний тонкостенной цилиндрической оболочки согласно новой модели отличаются от традиционной более чем на 5%.

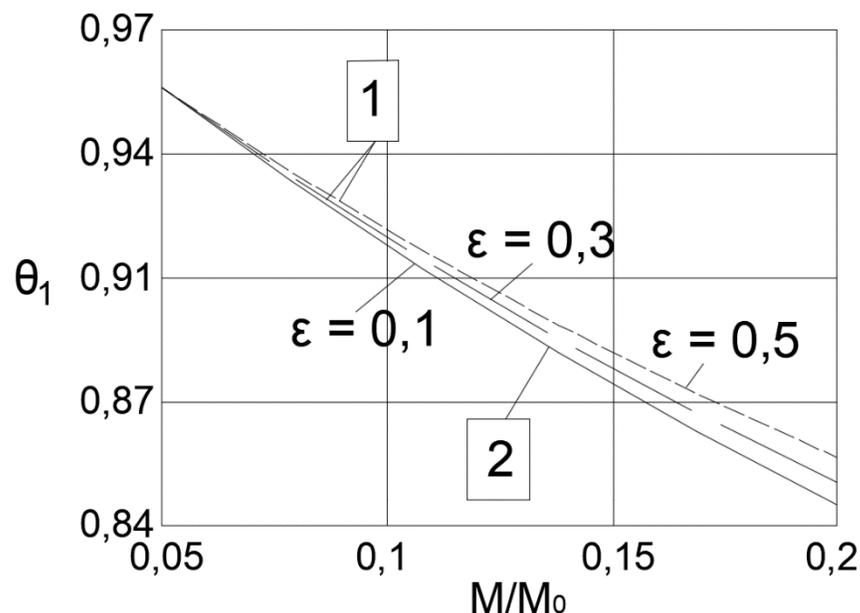


Рис. 1 Зависимость частоты колебаний от присоединенной массы цилиндрической оболочки: 1 – новое решение; 2 – традиционное решение.

Из графика (рисунок 1) видно, что при увеличении величины присоединенной массы увеличивается отклонение в численных характеристиках колебательного процесса. На начальных этапах ошибка данных незначительна, но при увеличении ошибка частоты увеличивается пропорционально величине присоединенной массы. Модель расчета, представленная в данной работе, более точно описывает частотные характеристики колебательного процесса тонкостенной цилиндрической оболочки, несущей присоединенную массу.

Практическая значимость

Новая математическая модель может быть использована для расчета конструкций в конструкторских бюро, занимающихся расчетом колебаний цилиндрических оболочек, несущих присоединенную массу.

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
6. Sysoev O.E., Dobryshkin A.Y., Nyein Sitt Naing et al. 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
7. Sysoev O.E., Dobrychkin A.Yu. 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
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.
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.
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

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

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

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. Antufev B.A. *Kolebaniya neodnorodnykh tonkostennykh konstruksii* (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. DOI: 10.17084/20764359-2021-52-99
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
6. Sysoev O.E., Dobryshkin A.Y., Nyein Sitt Naing et al. 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.E., Dobrychkin A. Yu. 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

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

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
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
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
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

22. Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Odinson 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 10.11.2022

Одобрена после рецензирования 16.11.2022

Принята к публикации 27.02.2023

The article was submitted on 10.11.2022; approved after reviewing on 16.11.2022; accepted for publication on 27.02.2023