

Эффективные испытательные стенды для исследования собственных колебаний разомкнутых цилиндрических оболочек и пластин

Добрышкин А.Ю.*, Сысоев О.Е., Сысоев Е.О.****

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет, КнАГУ,
пр. Ленина, 27, Комсомольск-на-Амуре, 681013, Россия*

**e-mail: wwwartem21@mail.ru*

***e-mail: fs@knastu.ru*

Статья поступила 09.07.2020

Аннотация

Для проведения экспериментальных исследований тонкостенных оболочек возникает потребность в испытательных стендах, с помощью которых можно с высокой точностью измерить один или несколько параметров. Один из самых существенных факторов – это исключение или сведение к минимуму погрешности измерений. Испытательные стенды позволяют существенно повысить качество измерений. В лаборатории строительных конструкций Комсомольского-на-Амуре Государственного Университета создан испытательный стенд для бесконтактного исследования свободных и вынужденных колебаний разомкнутых цилиндрических оболочек. Стенд металлический, жестко прикреплен к основанию, небольших размеров позволяет с высокой достоверностью измерять численные характеристики колебаний тонкостенных разомкнутых оболочек при изменении ширины, высоты и кривизны оболочек, а также способах крепления. Для его создания проведены исследования, направленные на выявление эффективных устройств, повышающих качество измерений.

Ключевые слова: тонкостенная цилиндрическая оболочка, испытательный стенд, свободные колебания.

Введение

Различные тонкостенные элементы конструкций в форме замкнутых и разомкнутых цилиндрических оболочек широко применяются при строительстве зданий, сооружений, трубопроводов, резервуаров и создании аэрокосмических объектов, которые работают при широком изменении градиента температур и других внешних воздействиях, вызывающих вынужденные колебания таких объектов. Вместе с тем в любой тонкостенной конструкции присутствуют собственные колебания. Наложения собственных и вынужденных колебаний конструкций приводят к свободным колебаниям и возможным резонансным явлениям. Искажение формы конструкции за счет температурных деформаций усложняет расчетную задачу. Часто проблема решается увеличением коэффициента запаса прочности при расчетах конструкции, что экономически нецелесообразно, приводит к значительному их удорожанию в процессе создания. Поэтому важно изучить процесс одновременного влияния деформаций формы оболочки, вызванных температурными изменениями на свободные колебания, как замкнутых, так и разомкнутых тонкостенных цилиндрических оболочек.

Проведенный сопоставительный анализ известных теоретических и экспериментальных данных показал их расхождение при различных геометрических параметрах конструкций. Процесс влияния температурных деформаций и колебаний

оболочки изучен не в полном объеме. Существующие теории неточно описывают колебания оболочки при различных температурных режимах. Во многих работах известных авторов (В. З. Власов, А. С. Вольмир, А. Л. Гольденвейзер, Э. И. Григолюк, П. С. Ковальчук, В. Д. Кубенко, Х. М. Муштари, В. В. Новожилов, С. П. Тимошенко, М. Amabili, L. N. Donnell, D и др. [1-7]) данный вопрос не рассматривается - температура оболочки при свободных колебаниях принята $t=\text{const}$, либо вообще не учитывается. Влияние локальных температурных деформаций на колебания оболочки в настоящее время изучены в недостаточном объеме. Нет полной картины, описывающей влияние локальных деформаций, вызванных изменением свойств материала, вследствие перепада температур.

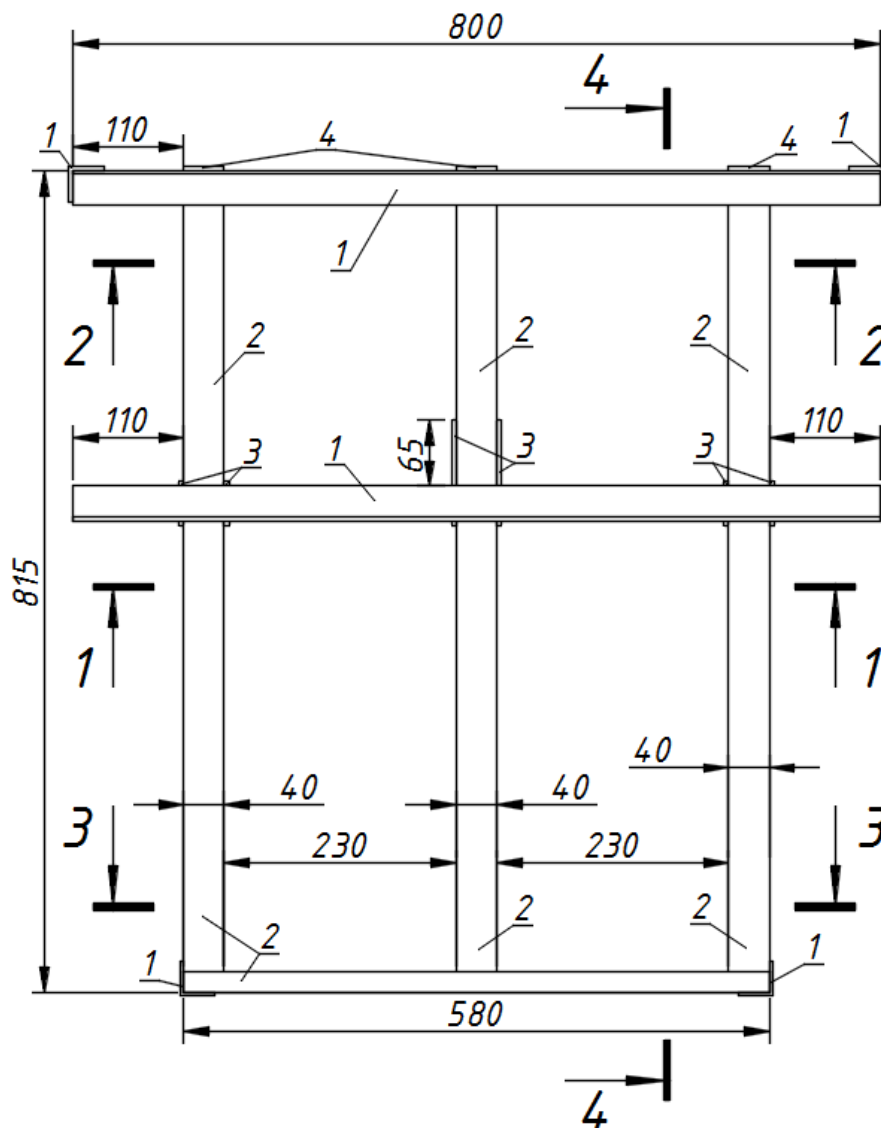
Экспериментальные исследования

Для исследования поведения собственных колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек от воздействия различных нагрузок, при различных напряженно-деформированных состояниях на базе Комсомольского-на-Амуре государственного университета был создан испытательный стенд. Установка дает возможность проведения испытаний с использованием образцов тонких цилиндрических замкнутых и разомкнутых оболочек при шарнирном опирании и жестком защемлении.

На рисунках 1 и 2 приведена схема установки для испытания шарнирно опертых разомкнутых оболочек и изогнутых пластин. Установка имеет размеры в плане: 800 мм на 815 мм и высотой 195 мм. Изготовлена из равнополочных уголков 35x4 мм по

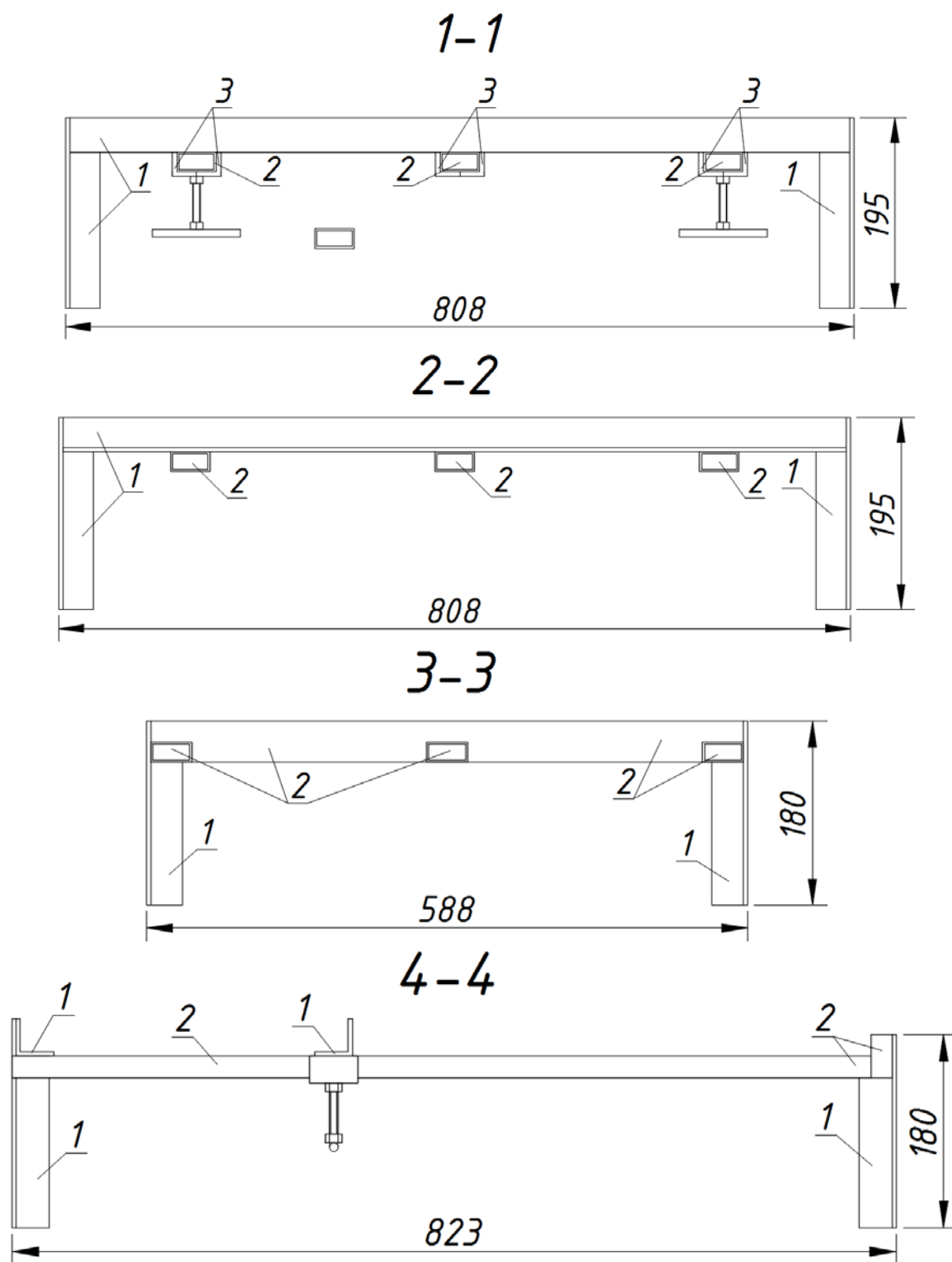
ГОСТ 8509-93 и трубы квадратной замкнутого сечения 40x20x2 мм согласно ГОСТ 8645-68, соединенных электродуговой ванной сваркой, с катетом шва в 2 мм.

Преимущества данной установки заключается в возможности проведения экспериментальных исследований для оболочек, размеры которых в плане не превышают 800 мм.



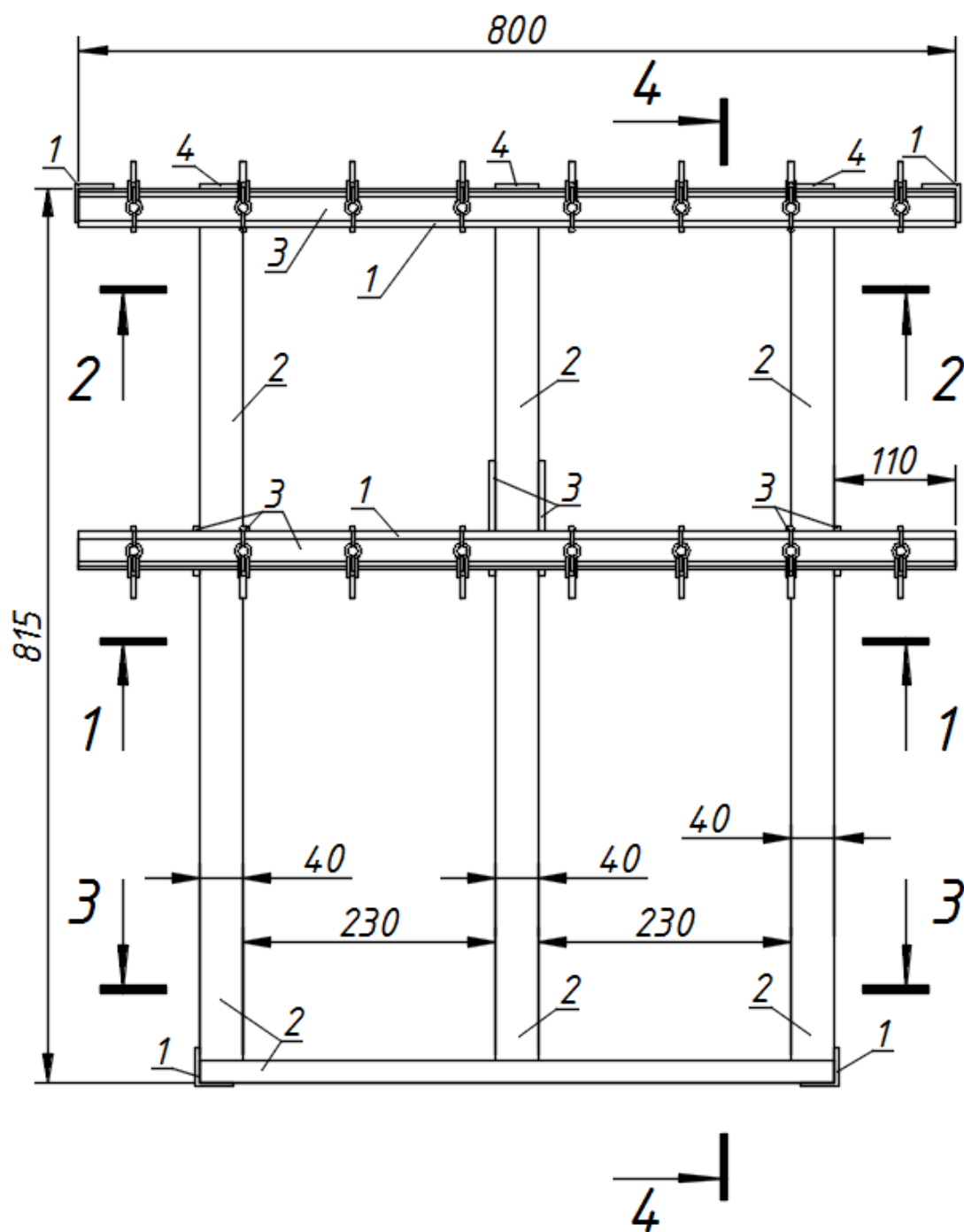
1 - Уголок равнополочный 35x4 мм.; 2 - Труба квадратная замкнутого сечения 40x20x2 мм.; 3 - Уголок равнополочный 25x4 мм.; 4 - Заглушка стальная лист горячекатаный $t=4$ мм.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения частотных характеристик колебаний шарнирно опертой оболочки.



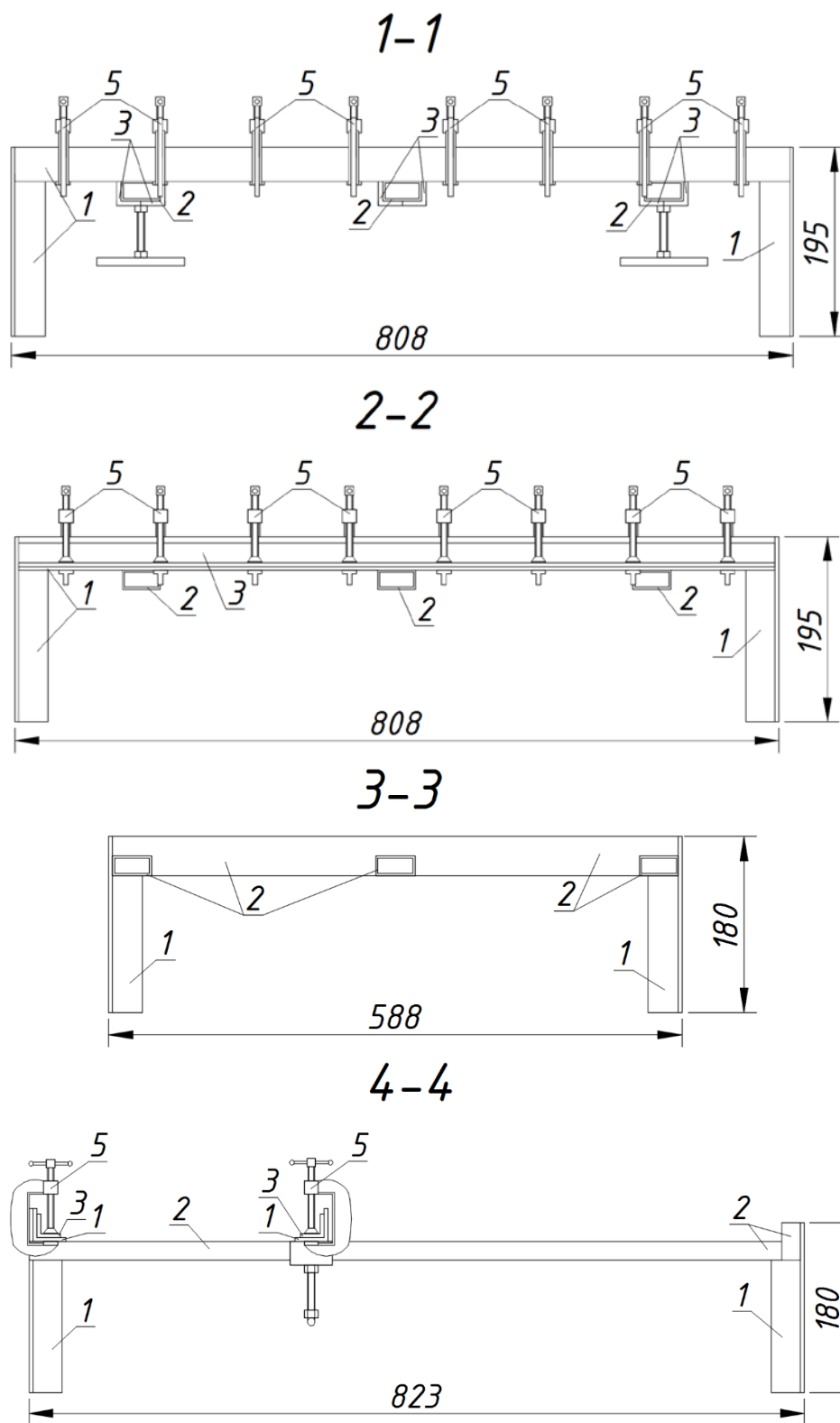
1 - Уголок равнополочный 35x4 мм. 2 - Труба квадратная замкнутого сечения 40x20x2 мм. 3 - Уголок равнополочный 25x4 мм. 4 - Заглушка стальная - лист горячекатанный $t=4$ мм.

Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения частотных характеристик колебаний шарнирно опертой оболочки.



- 1 - Уголок равнополочный 35x4 мм. 2 - Труба квадратная замкнутого сечения 40x20x2 мм. 3 - Уголок равнополочный 25x4 мм. 4 - Заглушка стальная - лист горячекатаный t=4мм. 5 - Струбина металлическая высотой h=50 мм

Рис. 3. Схема экспериментальной установки для определения частотных характеристик колебаний жестко заземленной оболочки.



- 1 - Уголок равнополочный 35x4 мм. 2 - Труба квадратная замкнутого сечения 40x20x2 мм. 3 - Уголок равнополочный 25x4 мм. 4 - Заглушка стальная - лист горячекатаный $t=4$ мм. 5 - Струбина металлическая высотой $h=50$ мм

Рис. 4. Схема экспериментальной установки для определения частотных характеристик колебаний шарнирно опертой оболочки.

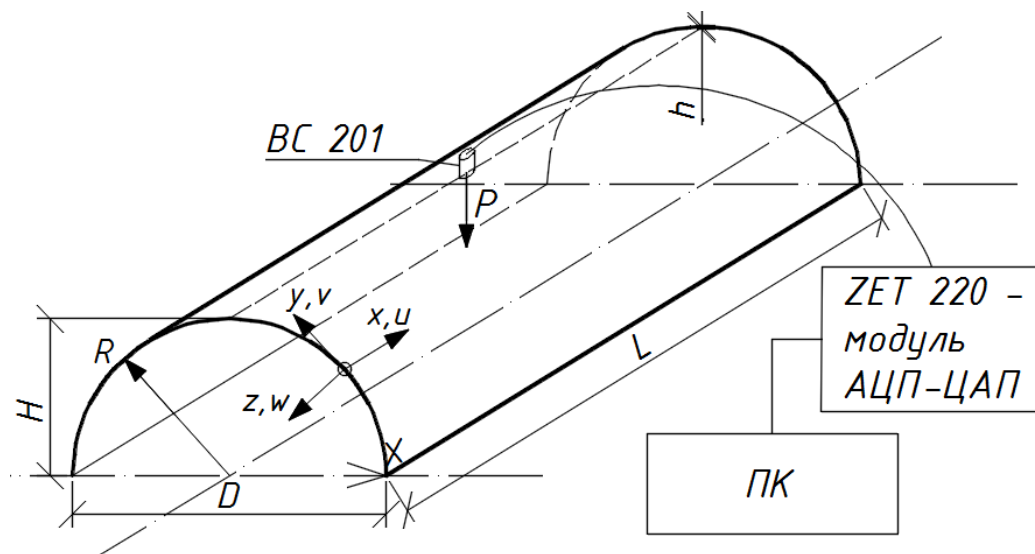


Рис. 5. Определение собственных частот колебаний с помощью акселерометра BC 201 и ZET 220 – модуль АЦП-ЦАП

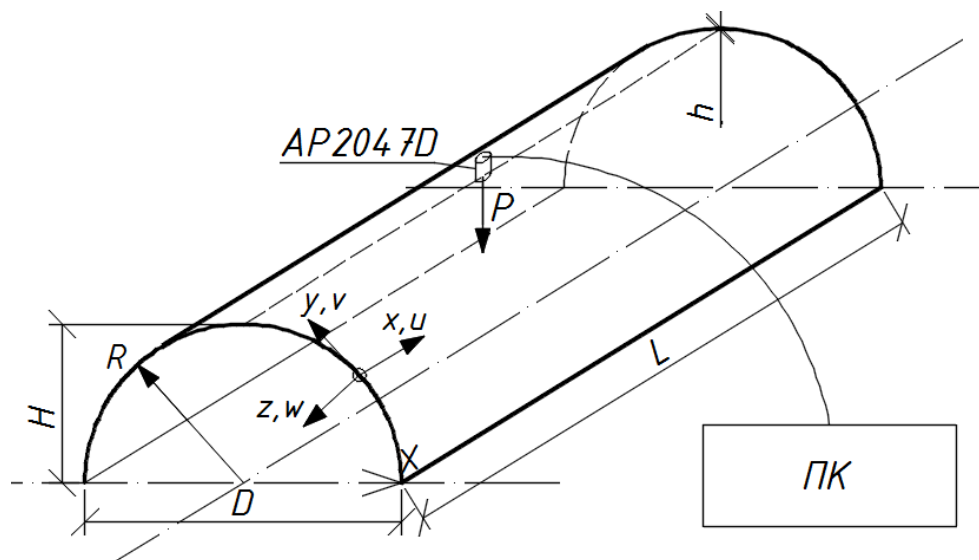


Рис. 6. Определение собственных частот колебаний с помощью цифрового USB акселерометра AP2047D



Рис. 7. Внешний вид акселерометра BC 201

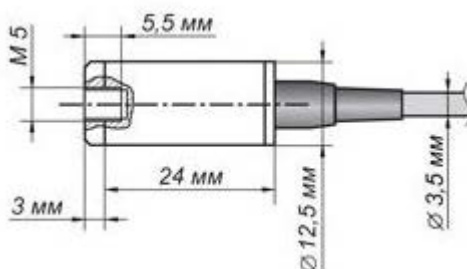


Рис. 8. Акселерометр BC 201

Преимущества акселерометра BC 201:

- измеритель линейных ускорений;
- регистратор сверхнизкочастотных колебаний;
- датчик крена-дифферента;
- чувствительность: 1000 мВ/г;
- частотный диапазон: до 500 Гц.

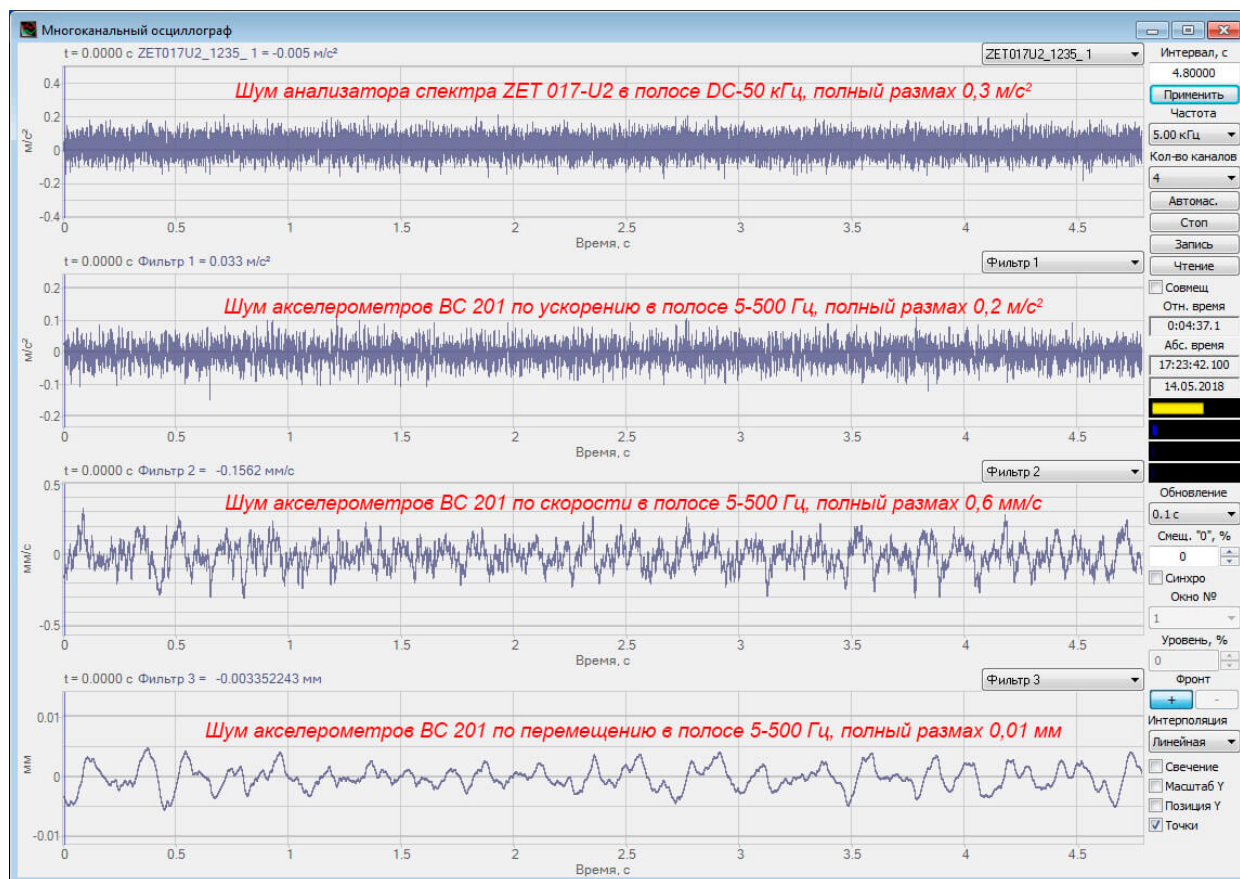


Рис. 9. Шум акселерометра BC 201



Рис. 10. ZET 220 - модуль АЦП-ЦАП

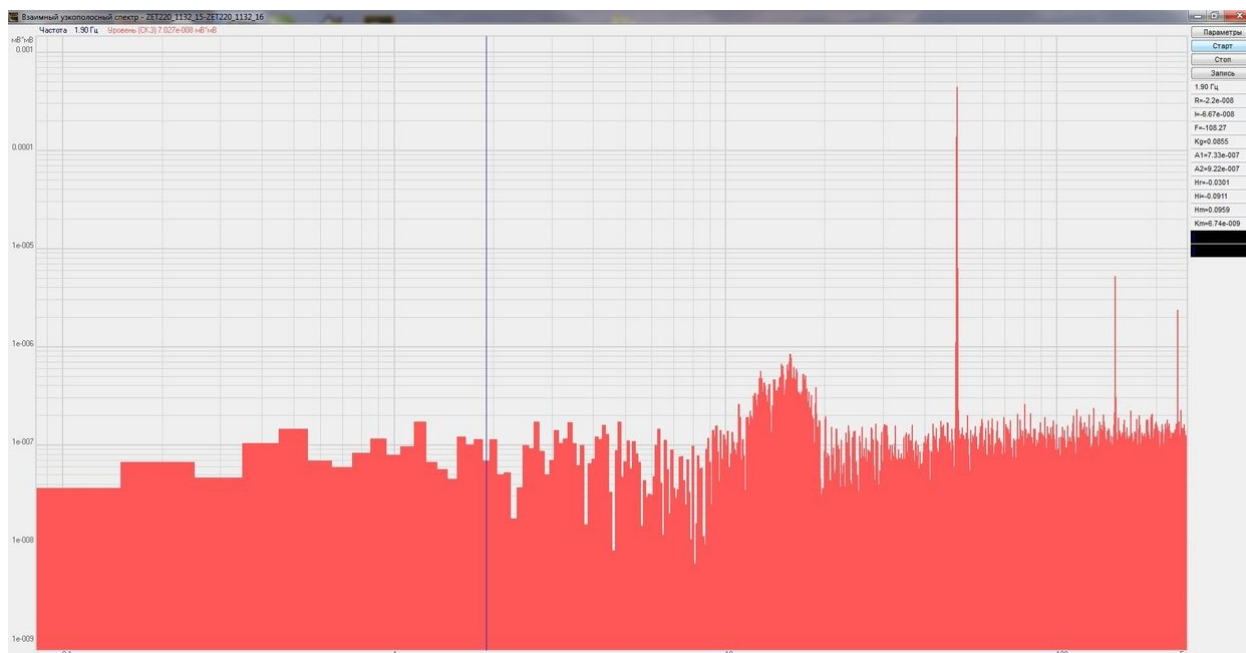


Рис. 11. Взаимно узкополосный спектр zet 220

Рассмотрев основные характеристики системы измерения колебаний, состоящей из акселерометра BC 201 и модуля АЦП-ЦАП ZET 220, перейдем к рассмотрению системы, состоящей из цифрового USB акселерометра AP2047D.

Назначение цифрового USB акселерометра AP2047D: измерение вибрационного и ударного ускорения в диагностических системах и при лабораторных исследованиях в условиях сильных электромагнитных полей.

Особенности цифрового USB акселерометра AP2047D:

- частотный диапазон до 15 кгц;
- встроенный ацп 24 бит;
- передача данных по стандарту usb 2.0;
- широкие частотный и динамический диапазоны;
- изоляция чувствительного элемента от корпуса, двойной экран;

- удобное в использовании многофункциональное по gtlab.

Возможности ПО GTLab для цифрового USB акселерометра AP2047D:

- Спектроанализатор, осциллограф;
- Модальный анализ;
- Вольтметр переменного и постоянного тока, частотомер;
- Взаимно-спектральный анализ;
- Измерение амплитудно- и фазочастотных характеристик;
- Цифровые фильтры ФНЧ, ФВЧ любого порядка;
- Запись данных на персональный компьютер с операционной системой

Windows XP/7/8/10;



Рис. 12. Цифровой USB акселерометр AP2047D

Таблица 1 – Характеристики акселерометра AP2047D

Наименование	Значение
Количество каналов	2
Коэффициент преобразования	
канал А:	5 мВ/(м·с ⁻²)
канал В:	10 мВ/(м·с ⁻²)
Диапазон измерения виброускорения (пик)	
канал А:	0,2÷98 м/с ²
канал В:	0,2÷196 м/с ²
Максимальный удар (пик)	±500 м/с ²
Рабочий диапазон температур	-20 ÷ +70 °С
Основная относительная погрешность измерения виброускорения в диапазоне 0,1÷196 м/с ²	±5 %
Частота выборки входного сигнала	48000 Гц
Питание:	
напряжение	+5 В
ток	80 мА
Материал корпуса	нержавеющая сталь
Тип соединителя	USB A(m)
Масса (без кабеля)	135 г
Уровень шума СКЗ	1,4 мВ
Поставляемые принадлежности	шпилька АН0106, ПО GTLab

Заключение

Таким образом, созданный испытательный стенд для контактного исследования свободных колебаний разомкнутых цилиндрических оболочек, позволяет

экспериментально на небольших моделях тонкостенных разомкнутых оболочек с высокой достоверностью оценить воздействия присоединенной массы моделей на их свободные колебания, что позволит учитывать влияние температур на свободные колебания оболочек, и точнее задавать запасы прочности при разработке проектов различных конструкций оболочного типа. Рассмотрев несколько вариантов стендового оборудования стоит отдать большее предпочтение системе из акселерометра ВС 201 и модуля АЦП-ЦАП ZET 220, так как он более точен и более функционален, так как есть возможность добавления датчиков, большая чувствительность измерений и меньшая рыночная стоимость на 16,7%.

Библиографический список

1. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике. – М. – Л.: Гостехиздат, 1949. – 784 с.
2. Кубенко В.Д. Ковальчук П.С., Краснопольская Т.С. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек. – Киев: Наукова думка, 1984. – 220 с.
3. Антуфьев Б.А. Колебания неоднородных тонкостенных конструкций. – М.: Изд-во МАИ, 2011. – 176 с.
4. 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>

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.E., Dobrychkin A.Yu., Nyein Sitt Naing, Baenkhaev A.V. 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 // *Juornal of Heilongjiang university of science and technology*, 2018, vol. 28, no. 1, pp.75 - 78.
8. Sysoev O.E., Dobrychkin A.Yu., Nyein Sitt Naing. Nonlinear Oscillations of Elastic Curved plate carried to the associated masses system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 262. DOI: [10.1088/1757-899X/262/1/012055](https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012055)
9. 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.
10. Y. Qu, H. Hua, and G. Meng. A domain decomposition approach for vibration analysis of isotropic and composite cylindrical shells with arbitrary boundaries // *Composite Structures*, 2013, vol. 95, pp. 307 – 321.
11. Y. Xing, B. Liu, and T. Xu. Exact solutions for free vibration of circular cylindrical shells with classical boundary conditions // *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, vol. 75, pp. 178 – 188.

12. M. Chen, K. Xie, W. Jia, and K. Xu. Free and forced vibration of ring-stiffened conical–cylindrical shells with arbitrary boundary conditions // Ocean Engineering, 2015, vol. 108, pp. 241 – 256.
13. H. Li, M. Zhu, Z. Xu, Z. Wang, and B. Wen. The influence on modal parameters of thin cylindrical shell under bolt looseness boundary // Shock and Vibration, 2016, DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4709257>
14. Foster N., Fernández–Galiano L. Norman Foster in the 21st Century. AV, Monografías, Artes Gráficas Palermo, 2013, pp. 163 – 164.
15. 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.
16. Hautsch N., Okhrin O., Ristig A. Efficient iterative maximum likelihood estimation of highparameterized time series models, Berlin, Humboldt University, 2014, 34 p.
17. 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>
18. 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>
19. 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.

20. 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>

21. 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>

Effective test benches for studying natural vibrations of open cylindrical shells and plates

Dobryshkin A.Yu.*, **Sysoev O.E.****, **Sysoev E.O.****

*Komsomolsk-on-Amur State University,
27, Lenin str., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia*

**e-mail: wwwartem21@mail.ru*

***e-mail: ks@knastu.ru*

Abstract

A need for experimental test benches, with which one or several parameters can be measured with high accuracy, arises for conducting tests of thin-walled shells. One of the most significant factors is exclusion or minimization of measurement errors. The purpose of this work consists in identifying a new regularity able to eliminate or physically reduce the calculation error when determining numerical oscillations characteristics of the thin-walled open shells of various curvatures. It was confirmed in the course of the research that a significant number of factors affect the accuracy of certain characteristics of the oscillatory process. Description of all physical laws, affecting measurements accuracy while experimental set up, touches on a significant time period. Thus, on the assumption of the conducted study a technical device, named a test bench, was manufactured in the course of this work. Test benches allow significant measurement quality increase. A test bench for contactless study of natural and forced oscillations of open cylindrical shells was developed in the engineering structures laboratory of the Komsomolsk-on-Amur State University. This test bench is metallic and rigidly attached to the base. Its small size allows measuring numerical characteristics of thin-walled open shells vibrations with high fidelity while measuring

their width, height and curvature, as well as mounting methods. The studies aimed at revealing effective devices improving measurements quality, were conducted for its creation.

The scope includes all thin-walled shells employed in aerospace technology, submarines and ground structures. In the course of shell structures operation accidents occur, sometimes with casualties. This circumstance necessitates improvement of technical and scientific aspects of calculation, as well as mathematical and physical models. Experiments setting and conducting for confirming and correcting the developed mathematical models is an integral part of these studies. Since human casualties take place while shells operation, the studies in this area should certainly be continued. Flights of spacecraft and other delivery vehicles, for which the shell is the only possible structural solution, make relevant the studies in the field of shells vibrations.

Keywords: thin-walled cylindrical shell, test bench, free vibrations.

References

1. Vlasov V.Z. *Obshchaya teoriya obolochek i ee prilozhenie v tekhnike* (General theory of shells and its application in technology), Moscow–Leningrad, Gostekhizdat, 1949, 784 p.

2. 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.
3. Antuf'ev B.A. *Kolebaniya neodnorodnykh tonkostennykh konstruktsii* (Oscillations of inhomogeneous thin-walled structures), Moscow, Izd-vo MAI, 2011, 176 p.
4. Sysoev O.E., Dobryshkin A.Yu., Nein Sit Naing. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90079>
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.E., Dobrychkin A.Yu., Nyein Sitt Naing, Baenkhaev A.V. 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, *Juornal of Heilongjiang university of science and technology*, 2018, vol. 28, no. 1, pp.75 - 78.
8. Sysoev O.E., Dobrychkin A.Yu., Nyein Sitt Naing. Nonlinear Oscillations of Elastic Curved plate carried to the associated masses system, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 262. DOI: [10.1088/1757-899X/262/1/012055](https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012055)

9. 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.
10. Y. Qu, H. Hua, and G. Meng. A domain decomposition approach for vibration analysis of isotropic and composite cylindrical shells with arbitrary boundaries, *Composite Structures*, 2013, vol. 95, pp. 307 – 321.
11. Y. Xing, B. Liu, and T. Xu. Exact solutions for free vibration of circular cylindrical shells with classical boundary conditions, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, vol. 75, pp. 178 – 188.
12. M. Chen, K. Xie, W. Jia, and K. Xu. Free and forced vibration of ring-stiffened conical–cylindrical shells with arbitrary boundary conditions, *Ocean Engineering*, 2015, vol. 108, pp. 241 – 256.
13. H. Li, M. Zhu, Z. Xu, Z. Wang, and B. Wen. The influence on modal parameters of thin cylindrical shell under bolt looseness boundary, *Shock and Vibration*, 2016, DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4709257>
14. Foster N., Fernández–Galiano L. *Norman Foster in the 21st Century*. AV, Monografías, Artes Gráficas Palermo, 2013, pp. 163 – 164.
15. 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.
16. Hautsch N., Okhrin O., Ristig A. *Efficient iterative maximum likelihood estimation of highparameterized time series models*, Berlin, Humboldt University, 2014, 34 p.
17. Belostochnyi G.N., Myl'tsina O.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58524>

18. 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>
19. 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.
20. 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>
21. 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>