

А. Л. Попов¹, В. М. Козинцев¹, Д. А. Челюбеев¹, А. А. Азаров²

ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ ЭЛЕМЕНТОВ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СТЕПЕНИ ИХ ЗАЛЕЧИВАНИЯ

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия

²Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

Аннотация. Предложен метод синхронного съёма виброакустической и спекл-интерферометрической информации для диагностики дефектов на примере диагностики дефектов в закреплении границы тестовой пластины в форме кардиоды. Метод позволяет судить не только о наличии дефектов по изменению спектрального состава её вибрационного и звукового полей, но и даёт возможность определения места дефекта по искажению спекл-интерферограммы поля перемещений поверхности пластины.

Ключевые слова: оптико-акустическая диагностика, акустическая спектроскопия, электронная спекл-интерферометрия.

DOI: 10.37972/chgpu.2022.54.4.003

УДК: 539.3

Введение

Одним из современных требований повышения надёжности и остаточного ресурса технических объектов является определение допустимых величин трещиноподобных дефектов, зон и уровней концентрации напряжений. При этом желательно, чтобы соответствующая диагностика выполнялась непосредственно в процессе эксплуатации технического объекта. В то же время, в связи с широким использованием разного

© Попов А. Л., Козинцев В. М., Челюбеев Д. А., Азаров А. А. 2022

Попов Александр Леонидович

e-mail: rorov@ipmnet.ru, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия.

Козинцев Виктор Михайлович

e-mail: kozincev@mail.ru, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия.

Челюбеев Дмитрий Анатольевич

e-mail: da-ch@yandex.ru, ведущий инженер, Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия.

Азаров Артур Александрович

e-mail: azaartale@mail.ru, аспирант, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия.

Поступила 20.11.2022

рода покрытий визуальный контроль таких дефектов становится затруднительным, не говоря уже о контроле за изменением внутренней микроструктуры материалов, уровнями остаточного и накопленного в процессе эксплуатации НДС. Сами покрытия, в особенности, содержащие более одного слоя, могут иметь в процессе эксплуатации тенденции к расслоениям и отслоениям от подложки. Аппаратура и методики оптико-механического исследования материалов и конструкций по отдельности широко используются при решении научных и прикладных задач. Например, электронная спекл-интерферометрическая методика оказалась наиболее оперативной методикой измерения остаточных напряжений [1–3]. Ультразвуковая диагностика является общепризнанным методом определения дефектов в конструкциях [4,5]. Однако, собранные воедино, методы акустической спектроскопии и электронной спекл-интерферометрии позволяют более объективно и конкретно судить о наличии дефектов в материале детали не только по изменению спектрального состава её вибрационного и звукового полей, но и по искажению спекл-интерферограммы перемещений поверхности детали, снимаемой в режиме реального времени одновременно с акустической информацией. Подобный подход динамического варианта оптической спекл-интерферометрии и ее применения рассмотрен в работах [6–8].

Аппаратура и образцы

Для объединения возможностей метода акустической спектроскопии и электронной спекл-интерферометрии был собран оптико-акустический стенд. В акустическую часть стенда вошли контактные возбудители колебаний: ударный молоток AU02 с датчиком силы AC21 и несколькими насадками, шарики из закалённой стали разных диаметров и масс, вибровозбудитель Роботрон 11075, бесконтактные электромагнитные возбудители вибрации (изготовлены исполнителями проекта), высокоточный генератор сигналов ГЗ-122, усилитель Verstarker LV 103, частотомер ЧЗ-63, направленные микрофоны типа BSWA MA231 с равномерной частотной характеристикой в звуковом диапазоне частот и достаточной осевой чувствительностью для выделения дискретных составляющих сигнала в диапазоне до 50 кГц, соединяемые с двух, либо четырёхканальным спектроанализатором A19-U2, A17-U4 и через них, - с ЭВМ. Оптическая часть оптико-акустического стенда представлена спекл-интерферометром, собранном по модифицированной схеме Майкельсона в составе твердотельного одночастотного термостабилизированного лазера LCM-S-111, 10-ти мегапиксельной камеры AV10115DN, полупрозрачного зеркала, установленного под углом 45° к направлениям падающих и отражённых лучей, стеклянных пластинок с диффузионно отражающими поверхностями, закрепленных на кубике с отверстиями, а также лазерного триангуляционного датчика РФ603. При закреплении образцов предусмотрена возможность параллельного съёма акустической и спекл-интерферометрической информации. В качестве тестовых образцов использовались пластины постоянной толщины различной формы. На рис. 1 (а) показана стальная круглая пластина с жестким контуром. Механические параметры пластины: плотность $\rho=7800$ кг/м³; модуль Юнга $E = 200000$ Па; радиус пластины $r = 75$ мм. На рис. 1 (b) показана пластина из алюминиевого сплава в форме кардиоиды толщиной $h = 0.2$ мм. По контуру пластина была зажата 7-ю винтами в толстую металлическую оправку. Так как теоретическая модель колебаний такой пластины до настоящего времени не разработана, то первая резонансная частота (880 Гц) её изгибных колебаний была подобрана с помощью генератора звука ГЗ-122 по максимальной амплитуде звукоизлучения, фиксируемой через микрофон и спектроанализатор.

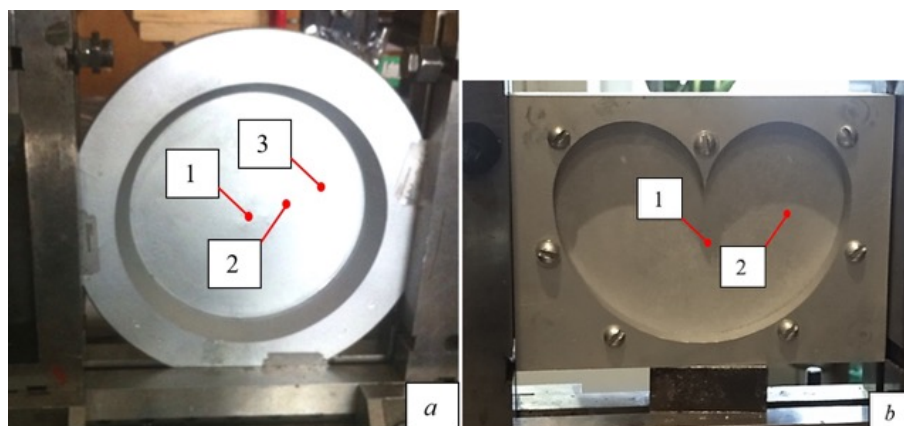
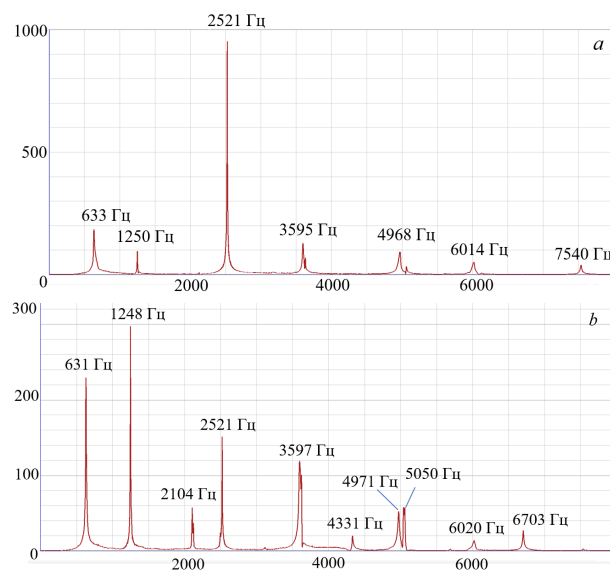


Рис. 1 Тестовые образцы (а) - круглая пластина, (б) - пластина-кардиоида (точки с номерами 1-3 показывает место ударного возбуждения пластины)

Применение ударного возбуждения для выявления собственных частот

В случае образца в виде круглой пластины, жестко заземленной по краю хорошо известны частотные уравнения и формы колебаний. Для образца пластины в форме кардиоиды такие данные отсутствуют. Чтобы оперативно определить спектр частот такой пластины используется ударное возбуждение [9] в сочетании с регистрацией спектра с помощью спектроанализатора, а форм колебаний - с помощью электронной спекл-интерферометрии. Проиллюстрируем этот подход вначале на круглой пластине. Так как спектр частот состоит из двух групп, одна из которых имеет в качестве узловых линий диаметры, а другая окружности, коаксиальные заделанному контуру, то единственным ударным возбуждением проявить все такие частоты не удастся. Поэтому в эксперименте выполнялись несколько ударных возбуждений в точках, показанных на рис. 1 (а). По полученным спектрам, приведенным на рис. 2, видно, что при ударе с растущим эксцентриситетом спектр становится богаче. Амплитуды экспериментальных спектров акустического давления по осям ординат отложены в единицах электрического сигнала, поступающего с микрофона (мВ).



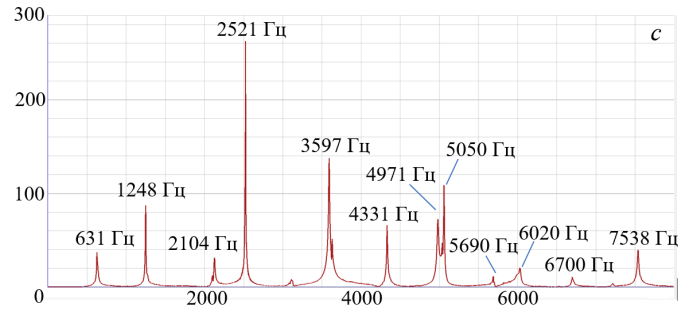


Рис. 2 Экспериментальные спектры акустического давления в диапазоне частот до 8000 Гц: (а) – ударное возбуждение в точке 1, (b) - в точке 2, (с) - в точке 3

На рис. 3 приведены некоторые характерные спекл-интерферограммы резонансных колебаний круглой пластины, соответствующие первым двум собственным частотам. Возбуждение резонансов как круглой, так и кардиоидной пластины осуществлялось с помощью бесконтактного электромагнитного возбудителя вибрации.

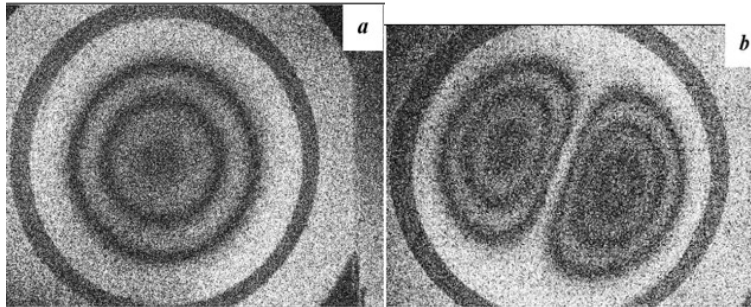
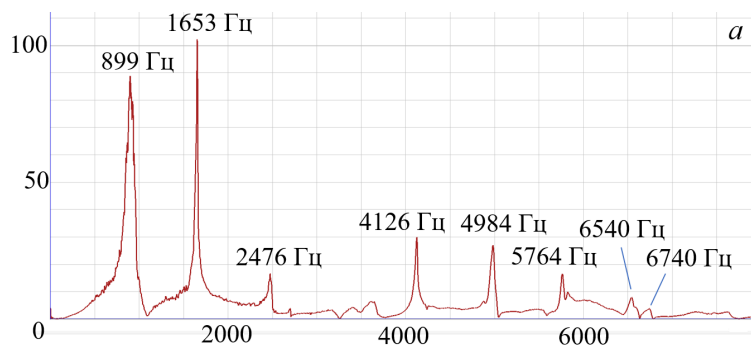


Рис. 3 Спекл-интерферограмма пластины: (а) – при 1-ой собственной частоте 631 Гц, (b) – при второй собственной частоте 1248 Гц

Полученные экспериментальные частоты и формы колебаний согласуются с теоретическими при соответствующем подборе параметров пластины.

Статический изгиб пластины в форме кардиоиды изучался в работе [10]. Теоретическая модель колебаний пластины-кардиоиды, насколько известно авторам, до сих пор не построена. Экспериментальное определение спектра частот пластины-кардиоиды выполнялось также как и круглой пластины; точки возбуждения колебаний представлены на рис.1 (б). Соответствующие спектры приведены на рис. 4 (а,б), из которых видно, что при ударе по точке 1, находящейся в середине оси симметрии пластины, отчетливо регистрируется 8 резонансных частот, а при ударе по точке 2 в середине площади одной из половин кардиоиды проявляется 11 резонансных частот.



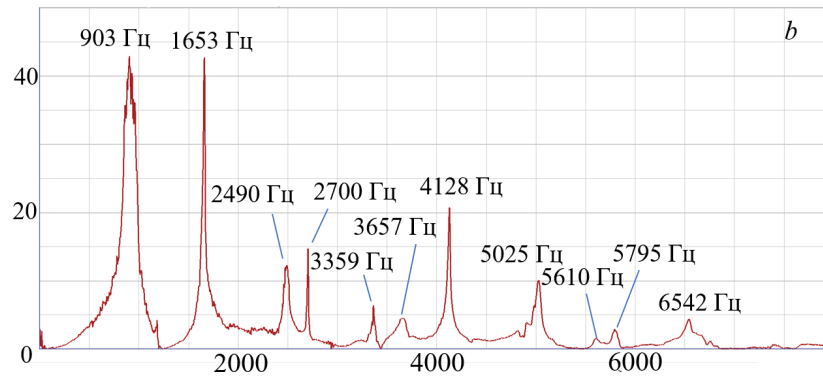


Рис. 4 Экспериментальный спектр акустического давления в диапазоне частот 0-8000 Гц: (а) – ударное возбуждение в точке 1, (b) - ударное возбуждение в точке 2

Наиболее интересными здесь являются первая и вторая резонансные частоты и формы колебаний. На рис. 5 приведены спекл-интерферограммы резонансных колебаний пластины кардиоиды, соответствующие первым двум собственным формам.

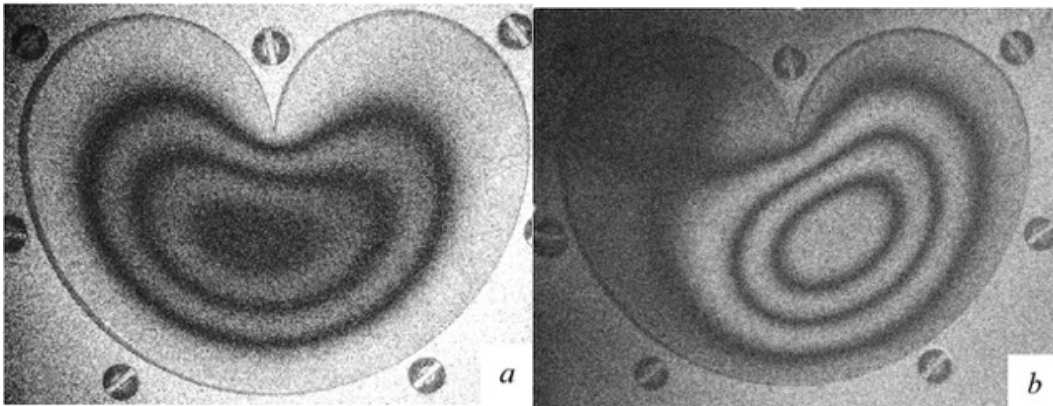


Рис. 5. Спекл-интерферограмма форм резонансных колебаний пластины-кардиоиды: (а) - на первой собственной частоте (899 Гц), (b) - на второй собственной частоте (1653 Гц) точке 1

Видно, что первая форма колебаний подобна аналогичной форме для круглой пластины; ее линии уровня коаксиальны заделке. Однако, в отличие от круглой пластины, вторая форма колебаний возбуждается преимущественно в той части пластины, на которую воздействует вибратор. Отсутствует вторая половина формы колебаний, подобная второй форме колебаний для круглой пластины изображенной на рис. 3б. Из этого сравнения может быть сделан вывод, что полюс кардиоиды препятствует передаче колебаний с возбуждаемой половины пластины на вторую половину, несмотря на то, что ожидаемая форма колебаний должна быть подобна соответствующей форме колебаний круглой пластины.

Создание искусственного дефекта и его диагностика

На рис. 6 (а) представлена фотография спекл-интерферограммы формы резонансных поперечных колебаний пластины – кардиоиды на первой собственной частоте – 899 Гц.

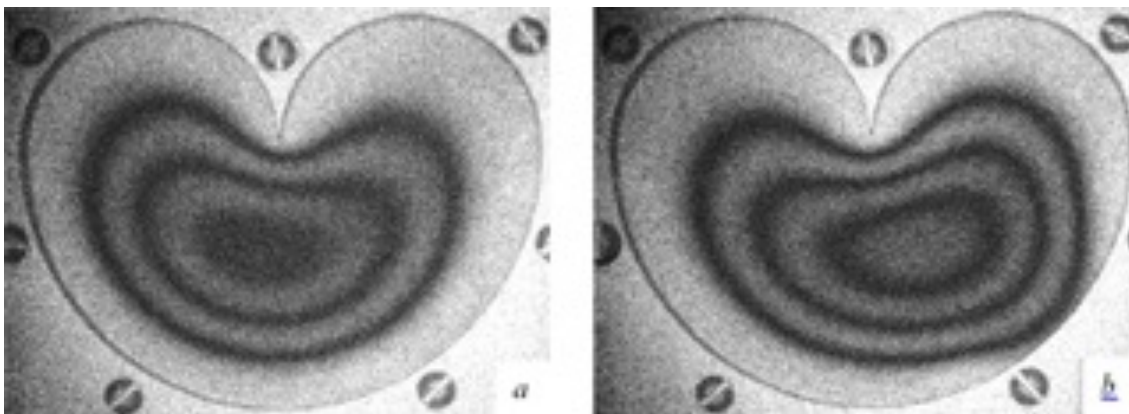


Рис.6 . Спекл-интерферограмма первой формы колебаний пластины в форме кардиоиды: а - при полной затяжке всех винтов крепления контура, б - при ослабленной затяжке двух винтов заделки

Полученная спекл-интерферограмма формы резонансных колебаний пластины представляет собой регулярную картину чередующихся темных и светлых полос, отражающих расположение линий уровня резонансного прогиба пластины с шагом по высоте, равным половине длины волны излучения примененного в интерферометре лазера (в данном случае - твердотельного зелёного лазера - этот шаг составляет 0.266 мкм). Видно, что зарегистрированные интерференционные полосы визуальны подобны контуру границы, прогиб на которой равен нулю, и огибают её на некотором расстоянии.

Характерным дефектом, возникающим при вибрации конструкций, является локальное ослабление её закрепления. Здесь такой дефект моделировался снижением затяжки двух рядом стоящих (внизу справа) винтов крепления пластины. Это, с одной стороны, вызывало снижение резонансной частоты колебаний пластины, а с другой, - искажение системы интерференционных полос в окрестности заделки. В данном случае частота снизилась до 875 Гц, а спекл-интерферограмма исказилась так, что на ней появился «флюс», указывающий на место ослабления заделки. На рис. 6 (b) показана эта интерферограмма.

По приведённым признакам можно контролировать как степень локального ослабления граничных условий, так и степень «залечивания» дефекта путём затягивания ослабленных винтов в заделке. Соответствующая интерферограмма после затяжки ослабленных винтов мало отличается от изображённой на рис. 6 (а). Однако она была получена не при частоте 899 Гц, а при 910 Гц, что свидетельствует о перетяжке слабо затянутых винтов в заделке по сравнению с исходным уровнем. Аналогичная диагностика и определение степени залечивания дефектов производилась и в случае создания нескольких дефектов такого типа.

Заключение

Проведенное тестирование показало преимущества объединения виброакустической и спекл-интерферометрической диагностики дефектов на примере диагностики дефектов в закреплении границы тестовой пластины. Важный признак такого дефекта - снижение резонансной частоты колебаний - является лишь интегральным признаком, по которому невозможно определить конкретное место расположения дефекта на контуре заделки. В то же время по конфигурации полос спекл-интерферограммы,

полученной на сниженной резонансной частоте колебаний пластины, однозначно определяется место расположения дефекта заделки контура пластины, после устранения которого восстанавливается исходная собственная частота колебаний пластины и спекл-интерферограмма соответствующей формы резонансных колебаний. Всё это показывает полезность объединения аппаратуры и методик синхронного съёма виброакустической и спекл-интерферометрической информации для диагностики дефектов элементов конструкций и степени их залечивания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев [и др.]. Москва: Наука, Физматлит, 1996. 240 с.
- [2] Попов А.Л., Козинцев В.М., Челюбеев Д.А. Левитин А.Л. Метод отверстия в диагностике остаточных напряжений // Прикладная математика и механика. 2021. Т. 85, № 2. С. 210–238.
- [3] Schajer G. S. Hole-drilling residual stress measurements at 75: origins, advances, opportunities // Experimental Mechanics. 2010. Vol. 50, no. 2. P. 245–253.
- [4] Клюев В.В. Неразрушающий контроль. Справочник в 8 томах. Москва: Машиностроение, 2008. 323 с.
- [5] Квартальнов С. В. Акустические методы контроля строительных конструкций. Метод акустической эмиссии // Аллея науки. 2018. Т. 1, № 11(27). С. 810–813.
- [6] Осипов М.Н., Щеглов Ю.Д. Некоторые аспекты применения спекл-интерферометрии одиночного спекла в научных и прикладных исследованиях // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4(4). С. 821–826.
- [7] Жужукин А.И., Непеин К.Г. Спекл-интерферометрическая установка для исследования частот и форм колебаний рабочих колес турбомашин // Инженерный журнал: наука и инновации. 2022. № 4(124). С. 1–11.
- [8] Владимиров А.П. Динамическая спекл-интерферометрия микроскопических и макроскопических процессов в деформируемых средах // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2015. № 6. С. 27–57.
- [9] Особенности экспериментального определения частот и форм собственных колебаний цилиндрической оболочки / И.С. Пономарев, Махнович, Пантिलеев С. В. [и др.] // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 3(64). С. 44–58.
- [10] Gaydon F.A., Shepherd W.M. The nature of the displacement in a slit plate subject to transverse forces // International Journal of Engineering Science. 1971. Т. 9. С. 621–629.

A. L. Popov¹, V. M. Kozincev¹, D. A. Chelyubeev¹, A. A. Azarov²

**OPTICAL-ACOUSTIC DIAGNOSTICS OF DEFECTS OF ELEMENTS
THIN-WALLED STRUCTURES AND THE DEGREE OF THEIR HEALING**

¹*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia*

Abstract. A method of synchronous removal of vibroacoustic and speckle interferometric information for the diagnosis of defects is proposed on the example of the diagnosis of defects in fixing the boundary of the test plate in the form of a cardioid. The method makes it possible to judge not only the presence of defects by changing the spectral composition of its vibration and sound fields, but also makes it possible to determine the location of the defect by distortion of the speckle interferogram of the field of plate surface changes.

Keywords: optical-acoustic diagnostics, acoustic spectroscopy, electron speckle interferometry.

REFERENCES

- [1] Thin-walled spatial systems / G. N. Chernyshev, A. L. Popov, V. M. Kozintsev et al. Moscow: Gosstroyizdat, 1996. 240 p. (in Russian).
- [2] Hole-Drilling Method in Residual Stress Diagnostics / A. L. Popov, V. M. Kozintsev, D. A. Chelyubeev et al. // Applied Mathematics and Mechanics. 2021. Vol. 85. P. 210–238.
- [3] Schajer G. S. Hole-drilling residual stress measurements at 75: origins, advances, opportunities // Experimental Mechanics. 2010. Vol. 50, no. 2. P. 245–253.
- [4] Klyuev V. V. Non-destructive testing. Handbook in 8 volumes. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 323 p. (in Russian).
- [5] Kvartal'nov S. V. Acoustic methods of control of building structures. Acoustic emission method // Alley of Science. 2018. Vol. 1, no. 11(27). P. 810–813. (in Russian).
- [6] Osipov M. N., Shcheglov Y. D. Some aspects of the application of speckle interferometry of single speckle in scientific and applied research // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016. Vol. 18, no. 4(4). P. 44–58. (in Russian).
- [7] Zhuzhukin A. I., Nepein K. G. Speckle interferometric installation for the study of frequencies and vibration patterns of impellers of turbomachines // Engineering Journal: Science and Innovation. 2022. no. 4(124). P. 1–11. (in Russian).
- [8] Vladimirov A. P. Dynamic speckle interferometry of microscopic and macroscopic processes in deformable media // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2015. no. 6. P. 27–57. (in Russian).

Popov Alexander Leonidovich Dr. Sci. Phys. & Math., Professor, Leading Research Worker, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
Kozintsev Viktor Mikhailovich Cand. Sci. Phys. & Math., Senior researcher, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
Chelyubeev Dmitry Anatolyevich Leading engineer, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
Azarov Artur Alexandrovich postgraduate student, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia.

-
- [9] Ponomarev I. S., Makhnovich S. V., Pantileev A. S. Features of experimental determination of frequencies and forms of proper oscillations of a cylindrical shell // Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University. 2016. no. 3(64). P. 44–58. (in Russian).
- [10] Gaydon F. A., Shepherd W. M. The nature of the displacement in a slit plate subject to transverse forces // International Journal of Engineering Science. 1971. Vol. 9. P. 621–629.