

Ф И З И К А

УДК 539.3/620.179.163

DOI: 10.31429/vestnik-16-1-66-72

О ВОЗМОЖНОСТЯХ БИСПЕКТРАЛЬНОГО ПОДХОДА К ОБРАБОТКЕ СИГНАЛА В ЗАДАЧАХ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Бочарова О. В., Анджинович И. Е., Лыжов В. А., Седов А. В., Калинин В. В.

ON POSSIBILITIES OF BISPECTRAL APPROACH TO SIGNAL PROCESSING
IN PROBLEMS OF LOW-FREQUENCY DEFECTOSCOPY

O. V. Bocharova¹, I. E. Andjikovich², V. A. Lyzhov^{1,2}, A. V. Sedov¹, V. V. Kalinchuk^{1,2}

¹ Southern Scientific Center, Rostov-on Don, Russia

² Southern Federal University, Rostov-on Don, Russia

e-mail: olga.v.bocharova@gmail.com

Abstract. A method of low-frequency diagnostics of internal inhomogeneities, based on the analysis of the parameters of the surface wave field created by shock, is proposed. For the processing of the recorded signal, a bispectral approach has been used, based on the use of optimal orthogonal signal expansions on a basis that is adaptively tuned by the training set. A series of experimental studies has been conducted to investigate the possibility of using this method for identifying inhomogeneities (cracks, inclusions). The influence of boundary conditions on the possibility of identifying inhomogeneities has been investigated. The results of experiments showed that the use of the proposed method provides a clear recognition of the type of defect in the diagnostic space of images.

Keywords: defect, nondestructive testing, surface wave field, bispectral approach.

Неразрушающий контроль и диагностика композитных материалов, является одним из актуальных направлений современной дефектоскопии. Скрытые неоднородности, возникающие как при производстве, так и при эксплуатации в условиях высоких нагрузок и вибраций могут привести к непоправимым последствиям. Этот факт определяет необходимость использования различных методов неразрушающего контроля [1, 2], а также развития новых методов диагностики наличия дефектов в различных объектах [3–14]. В работах [3–5] представлены различные подходы к проблеме идентификации дефектов в элементах стержневых конструкций, позволяющие определять их наличие и местоположение, а также степень поврежденности. В ра-

боте [6] рассмотрены задачи идентификации трещины в изотропном линейно упругом теле. Для решения задачи используется метод, основанный на применении функционала взаимности. Предложена процедура, с помощью которой геометрические параметры дефекта выражаются через значения функционала взаимности. В настоящей работе предлагается метод акустической диагностики внутренних неоднородностей (трещин и включений) посредством анализа параметров поверхностных волн, созданных ударным возмущением. Исследуется влияние граничных условий на возможность идентификации неоднородностей.

Все подходы, применяемые в ультразвуковой и низкочастотной диагностике, исполь-

Бочарова Ольга Витальевна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории динамики неоднородных структур Южного научного центра РАН; e-mail: olga.v.bocharova@gmail.com.

Анджинович Игорь Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела волновых процессов Южного федерального университета; e-mail: ocean_8@mail.ru.

Лыжов Вячеслав Александрович, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории динамики неоднородных структур Южного научного центра РАН; e-mail: maggod-rnd@yandex.ru.

Седов Андрей Владимирович, д-р физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории динамики неоднородных структур Южного научного центра РАН; e-mail: sedov_a.v@mail.ru.

Калинчук Валерий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией динамики неоднородных структур Южного научного центра РАН; e-mail: kalin@ssc-ras.ru.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ в рамках научных проектов (проекты 18-38-00871-мол_a, 18-08-01012).

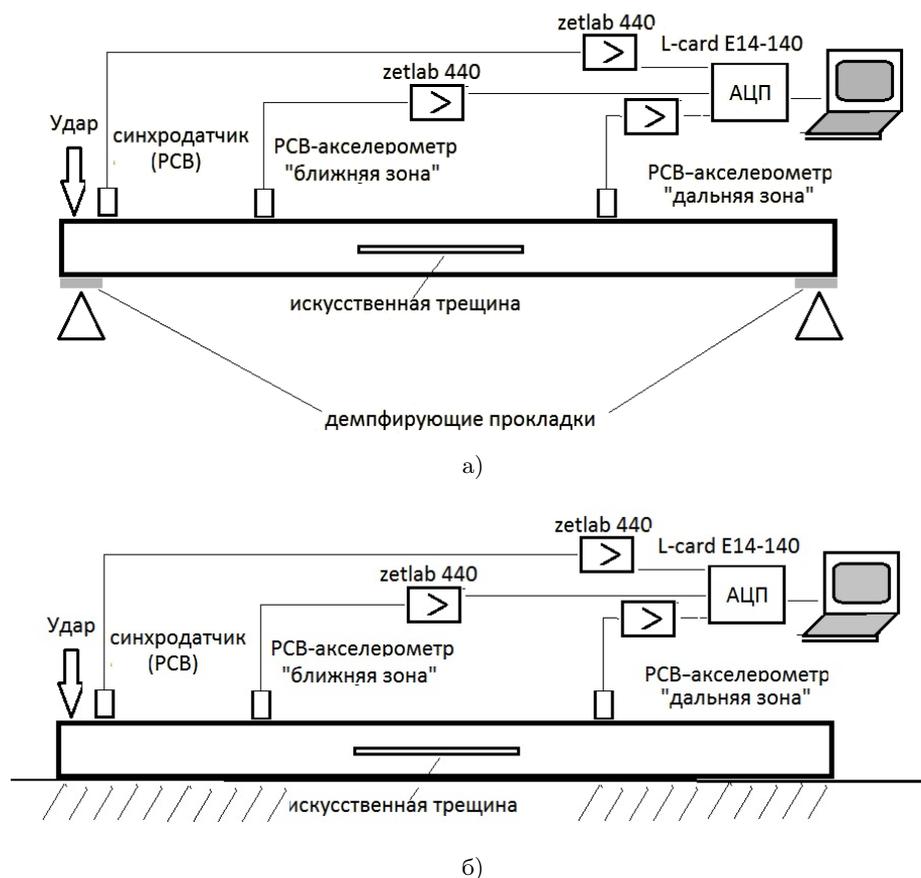


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: а) балка опирается на две опоры через виброизолирующие демпфирующие прокладки (для снижения влияния посторонних резонансов и акустического фона); б) балка приклеена на плоскую массивную поверхность

зуют различные методы обработки сигналов. Часто для обработки регистрируемого сигнала применяют спектральные методы [7], статистические подходы, корреляционную обработку [8], вейвлет-преобразование сигналов, подходы на основе использования искусственных нейронных сетей [9]. В [10] развит оригинальный метод, позволяющий существенно повысить информативность данных измерения за счет использования биспектрального подхода к обработке сигнала. На его основе проведен цикл исследований в области диагностики различных дефектов [11–14], показавший эффективность предложенного метода.

В настоящей работе предложенный в [10] метод реализован на результатах серии экспериментальных исследований по идентификации неоднородностей. Продемонстрирована высокая эффективность предложенного метода.

1. Методы исследований

В лабораторных условиях на упрощённых моделях сложных конструкций реализован биспектральный подход к анализу параметров поверхностной волны. Анализировались изменения поверхностной волны в зависимости от условий крепления модели и от типа дефекта (трещина или включение). В качестве образца служила алюминиевая балка квадратного сечения $16 \times 16 \text{ мм}^2$ длиной 490 мм, находящейся в двух вариантах крепления. Соответствующие схемы экспериментальных установок приведены на рис. 1.

Рассматривались 2 вида образцов: образец, ослабленный трещиной, и образец с жестким включением. Трещина представляла собой сквозную прорезь толщиной 0,5 мм и шириной 40 мм, созданную при помощи электроискрового лобзика в середине балки (на глубине 8 мм). Жесткое включение имело раз-



Рис. 2. Поверхностное волновое поле для образцов с трещиной и с включением

меры и расположение, аналогичные размерам и расположению трещины.

Цель предлагаемого в настоящей работе метода — по ударному воздействию получить информацию о состоянии среды. Ударное возмущение производилось электромагнитным ударным молотком, обеспечивающим постоянство условий возмущения во всех сериях измерений. Колебания исследуемой точки поверхности среды регистрировали калиброванным малогабаритным ИСР-акселерометром 352A24 фирмы PCB Piezotronics (США). Сигнал с акселерометра усиливался предварительным ИСР усилителем ZETLAB 440. Аналоговые сигналы подавались на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) L-Card E14-140, обрабатывались на компьютере программой PowerGraph и сохранялись для дальнейшей математической обработки. Для синхронизации записи в зоне ударного возмущения подключили дополнительный акселерометр, дающий команду начала записи процесса (старт-триггер синхронизация).

Измерения проводились датчиками, расположенными в «ближней» (до дефекта) и «дальней» зонах (после прохождения поверхностной волной дефекта). Датчик, расположенный в «ближней» зоне измеряет отраженную волну; датчик, расположенный в «дальней» зоне измеряет проходящую волну.

Параллельно проводился вычислительный эксперимент. Для расчета волнового поля на поверхности образца, ослабленного неоднородностью, использовался конечно-элементный пакет ANSYS. Волновое поле возбуждалось импульсом ступенчатой формы длительностью 50 микросекунд.

На рис. 2 показаны графики амплитуды волнового поля, измеренной на поверхности

закрепленного на опорах образца, датчиком, находящимся в «дальней зоне». По оси абсцисс отложено время в миллисекундах, по оси ординат — вертикальная компонента ускорения (мВ).

Для решения проблем диагностики дефектов использовался метод распознавания образов [10].

Выходное измеренное значение представляет собой скалярную функцию отклика $f^*(t)$, $t \in [0, T_n]$ на зондирующее действие F . Интервал времени T_n достаточен для стабильного выявления возникающих диагностируемых состояний. Обучающая выборка f^* формируется из отдельных графиков $f_i^*(t)$, полученных для различных типов дефектов в конструкции, но для одного типа зондирующего неразрушающего действия. Каждый график $f_i^*(t)$ может рассматриваться как вектор действительных значений $f_i^* = [f_{i1}^*, f_{i2}^*, f_{i3}^*, \dots, f_{iN}^*]^T \in R^N$ изменения отклика во времени. Шаг дискретизации Δt во времени или число отсчетов N на интервале наблюдения выбрано в соответствии с теоремой дискретизации [9].

На практике обучающая выборка сигналов может быть получена либо физическим экспериментом на моделях, либо математическим моделированием отклика образца с использованием пакетов прикладных программ, таких как ANSYS.

Предварительно к измеренным векторам f_i^* применялась процедура оценки амплитудных спектров $f_i^* = [f_{i1}^*, f_{i2}^*, f_{i3}^*, \dots, f_{iN}^*]^T \in R^N$ на основе дискретного преобразования Фурье

$$f_{ik} = \left| \sum_{l=0}^{N-1} f_{il}^* \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} lk\right) \right|.$$

Эта процедура повышает вычислительную устойчивость предложенного алгоритма.

Пусть n — число распознаваемых вариаций дефекта в конструкции. Каждой вариации мы ставим в соответствие вектор-столбец $f_i \in R^N$. Тогда выборка для n вариаций дефектов будет матрица $\{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\} \in R^{N \times n}$. Условно число векторов f_i в исследуемой выборке $\{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\} \in R^{N \times n}$ определяется числом n распознаваемых дефектов в конструкции. Изначально набор векторов $\{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}$ линейно независимый. Это объясняется избыточной размерностью векторов $f_i \in R^N$, близостью форм графиков $f_i(t)$.

Основа распознавания — это нахождение такого ортогонального преобразования $\Xi \in R^{N \times m}$ матрицы $f \in R^{n \times N}$ в матрицу $A \in R^{n \times m}$ вида $A = f\Xi$. Матрица $\Xi = [\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_m]$ при этом определяет такое линейное подпространство в R^N , для которого верно, что множество возможных линейных комбинаций ее векторов также является линейным пространством — линейной оболочкой.

Векторы $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_m$ образуют ортонормированный базис в R^N и для матрицы Ξ верно $\Xi^T \Xi = I_m$. Условно матрицу Ξ можно рассматривать как матрицу ортогонального сжатия линейного пространства R^N в пространство R^m . Вектора $f_i \in R^N$ откликов преобразуются с помощью Ξ в образы $A_i \in R^m$. При этом вся исследуемая матрица откликов f преобразуется в матрицу образов $A = [A_1, A_2, A_3, \dots, A_n]^T \in R^{n \times m}$. В общем виде ортогональное разложение исходных векторов $f_i \in R^N$ по базису Ξ можно представить в виде $f_i = \Xi A_i + A_0$, где A_0 — постоянная составляющая преобразования.

Ортонормированный базис $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \dots, \xi_m$ является адаптивно настраиваемым и зависящим от распознаваемой выборки $\{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\} \in R^{N \times n}$.

При определении базиса решается комплекс оптимизационных задач:

1. Наилучшей воспроизводимости: $\|f - A\Xi^T - A_0\|_2 \rightarrow \min$, где $A_0 \in R^{n \times N}$ — матрица постоянных составляющих преобразования, состоящая из векторов A_0 ;

2. Ортонормированности базиса: $\|\Xi^T \Xi - I_m\|_2 \rightarrow \min$. Требование ортогональности Ξ объясняется необходимостью получения линейно-независимых признаков,

несущих каждый «свою» неповторяющуюся информацию о процессе f ;

3. Наилучшей различимости:

$$d^2(A) = \frac{1}{m^2 - m} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^m \|A_i - A_j\|_2 \rightarrow \max.$$

Для решения представленных оптимизационных задач получения ортогонального базиса использовались модификации градиентных методов (наискорейшего спуска, Марквардта).

Для простоты физической интерпретации дефектоскопию образцов будем осуществлять по образам $A_i = (a_{i1}, a_{i2}) \in R^2$ в двумерном признаковом пространстве. Как показали исследования, указанная размерность признакового пространства достаточна для проведения качественной диагностики образцов.

2. Результаты исследований и их обсуждение

Проведена серия экспериментов по численной обработке сигнала. Исследовалась возможность распознавания типа дефекта по отраженному (рис. 3) и по проходящему волновому полю (рис. 4).

На рис. 3 и рис. 4 приведены результаты построения признакового диагностического пространства. Показаны кластеры (выделены эллипсами) для: 1 — балки на опорах, ослабленной трещиной; 2 — балки на опорах с включением; 3 — жестко заземленной балки с включением; 4 — жестко заземленной балки с трещиной. Внутри кластеров расположены образы функций откликов (помечены звездочками) для различных образцов. Для каждого варианта дефекта провели несколько измерений. Серия измерений демонстрирует достаточно высокую степень повторяемости регистрируемого сигнала.

Результаты экспериментов показывают распознавание типа дефекта в образце как в «ближней», так и в «дальней» зоне. Причём, более ощутима разница при опорном закреплении образца.

Из полученных результатов следует, что в диагностическом пространстве распознавания имеется чёткое распределение образов функций откликов в зависимости от типа дефекта. Это подтверждает эффективность предложенного подхода к повышению информативности регистрируемых сигналов.

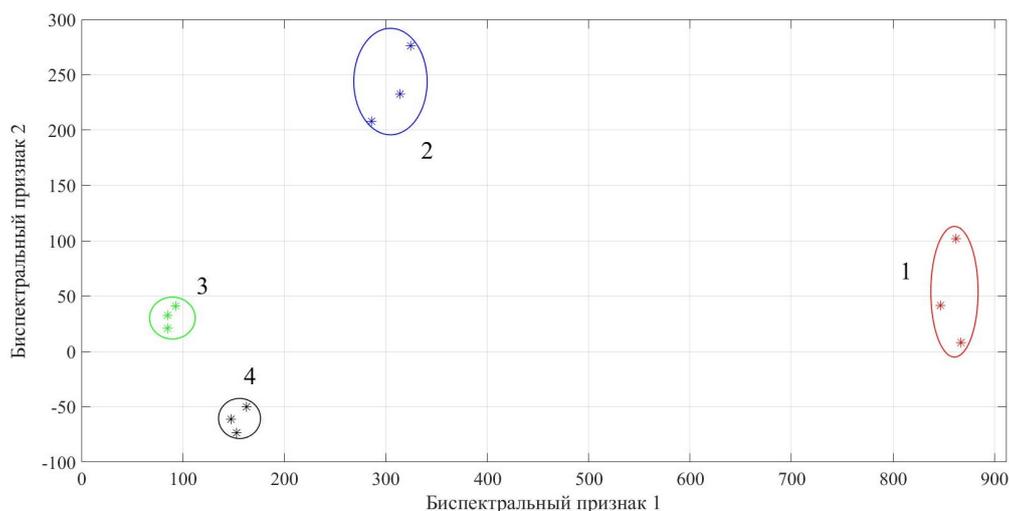


Рис. 3. Распознавание типа дефекта по отраженному волновому полю

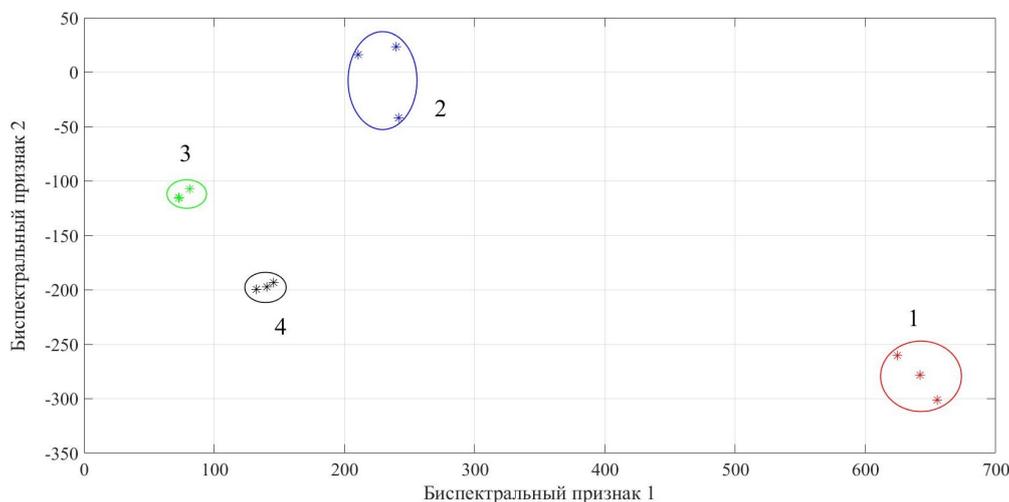


Рис. 4. Распознавание типа дефекта по проходящему волновому полю

Выводы

Предложен и реализован биспектральный подход к обработке сигналов в задачах распознавания скрытых дефектов по функции отклика на поверхности среды. Данный подход основан на адаптивно-настраиваемом ортонормированном базисе.

Результаты проведенных экспериментов показали, что при измерении как отраженной волны, так и проходящей волны обеспечивается хорошая различимость типа дефекта.

Исследовано влияние граничных условий на возможность идентификации неоднородностей. Результаты экспериментов показывали, что при опорном закреплении образца рас-

познавание типа дефекта более эффективно, чем при жестком заземлении образца.

Литература

1. Методы неразрушающих испытаний / Под ред. Р. Шарпа. М.: Мир, 1972. 494 с.
2. Неразрушающие методы контроля / Под ред. В.Я. Кершенбаума. М.: Наука и техника, 1992. 656 с.
3. Есипов Ю.В., Мухортов В.М., Калинин В.В. Испытательная установка для анализа деформации моделей трехмерных конструкций // Измерительная техника. 2008. № 10. С. 39–42.
4. Есипов Ю.В., Мухортов В.М., Калинин В.В., Анджинович И.Е. О возможности раннего диагноза состояния стержневых конструкций с применением сегнетоэлектрических датчиков динамической деформации //

Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2010. № 4. С. 29–35.

5. Акопьян В.А., Черпакон А.В., Рожков Е.В., Соловьев А.Н. Интегральный диагностический признак идентификации повреждений в элементах стержневых конструкций // Контроль. Диагностика. 2012. № 7. С. 50–56.
6. Капцов А.В., Шифрин Е.И., Шушпанников П.С. Определение параметров плоской эллиптической трещины в изотропном линейно упругом теле по результатам одного испытания на одноосное растяжение // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2012. № 4. С. 71–88.
7. Бочарова О.В., Лыжов В.А., Анджи́кович И.Е. Некоторые особенности волновых полей на поверхности тел, ослабленных наличием дефектов // Вестник Южного научного центра РАН. 2013. Т. 9. № 2. С. 11–15.
8. Бочарова О.В., Анджи́кович И.Е., Ворович Е.И. К проблеме исследования поверхностных волновых полей с помощью тонкопленочных сегнетоэлектрических датчиков // Вестник Южного научного центра РАН. 2015. Т. 11. № 1. С. 30–35.
9. Соловьев А.Н., Соболев Б.В., Васильев П.В. Ультразвуковая локация внутренних трещиноподобных дефектов в составном упругом цилиндре с применением аппарата искусственных нейронных сетей // Дефектоскопия. 2016. Т. 52. № 3. С. 3–9.
10. Седов А.В. Моделирование объектов с дискретно-распределенными параметрами: декомпозиционный подход. М.: Наука, 2010. 438 с.
11. Бочарова О.В., Седов А.В., Анджи́кович И.Е., Калинин В.В. Об одном методе идентификации дефектов, основанном на контроле структуры и особенностей поверхностных волновых полей // Дефектоскопия. 2016. Т. 52. №7. С. 21–28.
12. Бочарова О.В., Анджи́кович И.Е., Седов А.В., Калинин В.В. Возможности биспектрального подхода к обработке сигнала // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 62–65.
13. Sedov A. V., Kalinchuk V. V., Bocharova O. V. Adaptive-spectral method of monitoring and diagnostic observability of static stresses of elements of mechanical constructions. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Сер. “Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Mechanical Engineering” 2017. С. 082043.
14. Бочарова О.В., Седов А.В., Анджи́кович И.Е., Калинин В.В. Об эффективном методе обработки сигнала в задачах низкочастотной дефектоскопии // Экологический вестник научных центров Черноморского экономическо-

го сотрудничества. 2016. № 4. С. 20–25.

References

1. Sharp R. (ed) *Metody nerazrushayushchikh ispytaniy* [Non-destructive testing methods]. Mir, Moscow, 1972. (In Russian)
2. Kershenbaum V.Ya. (ed) *Nerazrushayushchie metody kontrolya* [Non-destructive testing methods]. Nauka i tekhnika, Moscow, 1992. (In Russian)
3. Esipov Yu.V., Mukhortov V.M., Kalinchuk V.V. Ispytatel'naya ustanovka dlya analiza deformatsii modeley trekhmernykh konstruksiy [Testing facility for deformation analysis of three-dimensional structures models]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 2008, no. 10, pp. 39–42. (In Russian)
4. Esipov Yu.V., Mukhortov V.M., Kalinchuk V.V., Andzhikovich I.E. O vozmozhnosti ranego diagnoza sostoyaniya stержnevyykh konstruksiy s primeneniem segnetoelektricheskikh datchikov dinamicheskoy deformatsii [On the possibility of early diagnosis of the state of rod structures using ferroelectric dynamic deformation sensors]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tse ntrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2010, no. 4, pp. 29–35. (In Russian)
5. Akopyan V.A., Cherpakov A.V., Rozhkov E.V., Solov'ev A.N. Integral'nyy diagnosticheskiy priznak identifikatsii povrezhdeniy v elementakh stержnevyykh konstruksiy [Integrated diagnostic feature in the identification of damage in beam structures elements]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2012, no 7, pp. 50–56. (In Russian)
6. Kaptsov A.V., Shifrin E.I., Shushpannikov P.S. Opredelenie parametrov ploskoy ellipticheskoy treshchiny v izotropnom lineyno uprugom tele po rezul'tatam odnogo ispytaniya na odnoosnoe rastyazhenie [Determination of parameters of a flat elliptical crack in an isotropic linearly elastic body according to the results of a single uniaxial tensile test]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Solid mechanics], 2012, no. 4, pp. 71–88. (In Russian)
7. Bocharova O.V., Lyzhov V.A., Andzhikovich I.E. Nekotorye osobennosti volnovyykh poley na poverkhnosti tel, oslablennykh nalichiem defektov [Some features of wave fields on the surface of bodies weakened by defects]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Southern Scientific Center of RAS], 2013, vol. 9, no. 2, pp. 11–15. (In Russian)
8. Bocharova O.V., Andzhikovich I.E., Vorovich E.I. K probleme issledovaniya poverkhnostnykh volnovyykh poley s pomoshch'yu tonko-

- plenochnykh segnetoelektricheskikh datchikov [On the problem of studying surface wave fields using thin-film ferroelectric sensors]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Southern Scientific Center of RAS], 2015, vol. 11, no. 1, pp. 30–35. (In Russian)
9. Solov'ev A.N., Sobol' B.V., Vasil'ev P.V. Ul'trazvukovaya lokatsiya vnutrennikh treshchinopodobnykh defektov v sostavnom uprugom tsilindre s primeneniem apparata iskusstvennykh neyronnykh setey [Ultrasonic location of internal crack-like defects in a composite elastic cylinder using the apparatus of artificial neural networks]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2016, vol. 52, no 3, pp. 3–9. (In Russian)
 10. Sedov A.V. *Modelirovanie ob"ektov s diskretno-raspredelennymi parametrami: dekompozitsionnyy podkhod* [Modeling of objects with discrete-distributed parameters: decomposition approach]. Nauka, Moscow, 2010. (In Russian)
 11. Bocharova O.V., Sedov A.V., Andzhikovich I.E., Kalinchuk V.V. Ob odnom metode identifikatsii defektov, osnovannom na kontrole struktury i osobennostey poverkhnostnykh volnovykh poley [On a defect identification method based on the control of the structure and features of surface wave fields]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2016, vol. 52, no. 7, pp. 21–28. (In Russian)
 12. Bocharova O.V., Andzhikovich I.E., Sedov A.V., Kalinchuk V.V. Vozmozhnosti bispektral'nogo podkhoda k obrabotke signala [Possibilities of the bispectral approach to signal processing]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring Equipment], 2017, no 9, pp. 62–65. (In Russian)
 13. Bocharova O.V., Andzhikovich I.E., Sedov A.V., Kalinchuk V.V. Vozmozhnosti bispektral'nogo podkhoda k obrabotke signala [Ability of the bispectral approach to signal processing]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring Equipment], 2017, no. 9, pp. 62–65. (In Russian)
 14. Sedov A.V., Kalinchuk V.V., Bocharova O.V. Adaptive-spectral method of monitoring and diagnostic observability of static stresses of elements of mechanical constructions. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Series "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Mechanical Engineering"* 2017. P. 082043.
 15. Bocharova O.V., Sedov A.V., Andzhikovich I.E., Kalinchuk V.V. Ob effektivnom metode obrabotki signala v zadachakh nizkochastotnoy defektoskopii [On the effective method of signal processing in low-frequency flaw detection problems]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2016, no. 4, pp. 20–25. (In Russian)