

УДК 539.3/620.179.163

## ОБ ЭФФЕКТИВНОМ МЕТОДЕ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА В ЗАДАЧАХ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Бочарова О. В., Седов А. В., Анджинович И. Е., Калинчук В. В.

ON EFFICIENT METHOD OF SIGNAL PROCESSING IN PROBLEMS  
OF LOW-FREQUENCY DEFECTOSCOPY

Bocharova O. V.<sup>\*,\*\*</sup>, Sedov A. V.<sup>\*</sup>, Andjiovich I. E.<sup>\*\*</sup>, Kalinchuk V. V.<sup>\*,\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Southern Scientific Center, Rostov-on Don, 344006, Russia

<sup>\*\*</sup> Southern Federal University, Rostov-on Don, 344006, Russia

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

*Abstract.* A method for low-frequency diagnostics of internal inhomogeneities is proposed, based on the analysis of the surface wave field parameters, created by impact action. Multifunctional measuring complex, allowing carrying out research, comparing signals and constructing spectral characteristics by using sensors of various types, has been created to conduct a series of experimental investigations. For the processing of the recorded signal a bispectral method is applied based on using the optimal orthogonal expansions of the signal by its basis, adaptively set up on the training sample. A series of experimental studies has been carried out to investigate the possibility of using bispectral method to indentify the size and depth of the cracks. The experimental results have shown that the usage of the proposed method provides a clear recognition of the size and depth of the bedding cracks in the diagnostic space of images.

*Keywords:* defect, nondestructive testing, surface wave field, bispectral method.

Неразрушающий контроль и диагностика композитных материалов, в подавляющем большинстве представляющих собой многослойные конструкции, 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. Это определяет необходимость использования различных методов неразрушающего контроля [1, 2], а также развития новых методов контроля напряженного состояния конструкций [3, 4] и диагностики наличия дефектов в различных объектах [5–7]. В работах [3–5] был развит подход к определению начального напряженного состояния среды, выявлены закономерности, связывающие начальные напряжения с полем напряжений

в зоне контакта [3, 4], а также с резонансным поведением массивного тела [5]. В работе [6] предложен метод определения размеров полости балки по двум значениям собственной частоты ее изгибных колебаний, взятым из разных спектров. Изучена зависимость между значением собственной частоты и параметрами полости. В [7] предложен подход к идентификации полости в упругом цилиндре, основанный на использовании аналитических формул, полученных на основе методов теории возмущений. В [8, 9] представлены интегральные признаки идентификации дефектов в элементах стержневых конструкций, позволяющие определять их наличие и местоположение, а также степень поврежденности. Все подходы, применяемые в ультразвуковой и низкочастотной диагностике, используют различные методы обработки сигналов

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

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

Анджинович Игорь Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела волновых процессов Южного федерального университета; e-mail: ocean\_8@mail.ru

Калинчук Валерий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, заместитель председателя по науке Южного научного центра РАН; e-mail: kalin@ssc-ras.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (проекты 16-48-230068\_p\_юг\_a, 14-08-01213, 16-01-00647).

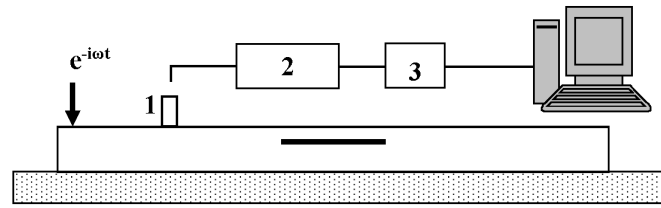


Рис. 1. Блок-схема эксперимента

(спектральный, корреляции, автокорреляции и т.п.), поскольку обработка сигнала определяет эффективность используемого метода неразрушающего контроля, как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации. В [10] для обработки параметров поверхностного волнового поля предложен биспектральный метод [11]. Впоследствии был проведен ряд вычислительных экспериментов [12–14] по определению возможностей предложенного метода обработки сигнала. В настоящей работе на результатах серии экспериментальных исследований иллюстрируется возможность использования биспектрального метода для идентификации размеров и заглупления трещины.

## 1. Методы исследования

Предлагается метод низкочастотной диагностики внутренних неоднородностей (трещин), основанный на анализе параметров поверхностного волнового поля, созданного ударным возмущением. Для проведения серии экспериментальных исследований был создан многофункциональный измерительный комплекс, позволяющий сопоставлять сигналы и строить спектральные характеристики датчиками различного типа.

Блок-схема эксперимента представлена на рис. 1. В качестве экспериментальных образцов использовались стержни из алюминия длиной 500 мм и сечением  $40 \times 40$  мм. Трещины были выполнены лазерным резцом в виде тонких горизонтальных разрезов различной длины и на различном заглуплении. Возбуждение волнового поля осуществлялось электромагнитным ударным устройством путем воздействия на край модели среды. Сигнал, регистрирующий прохождение поверхностной волны, снимается акселерометром В&К (1), усиливается усилителем заряда В&К 2626 (2) и после оцифровки блоком (3) АЦП L-Card (E14-140) обрабатывается в программе PowerGraph на компьютере.

Характерный вид акселерограмм для образца без дефектов (сплошная линия) и образца, ослабленного трещиной длиной 30 мм (пунктир), представлен на рис. 2. По оси абсцисс отложено время в секундах, по оси ординат — вертикальная компонента ускорения с множителем  $k = 10^8$  (м/с<sup>2</sup>).

Для определения в образце наличия трещины и ее параметров сигнал обрабатывался при помощи биспектрального метода [11]. С этой целью колебания точки поверхности  $f(t)$ ,  $t \in [0, T_n]$  регистрировались датчиком в течение временного интервала  $T_n$ , достаточного для прихода отраженных волн от противоположного конца конструкции.

Традиционно для обработки регистрируемого сигнала применяют спектральные методы, статистические подходы, корреляционную обработку, вейвлет-преобразование сигналов, подходы на основе использования искусственных нейронных сетей. В настоящей работе используется метод, основанный на использовании оптимальных ортогональных разложений сигналов по базису, адаптивно настраиваемому по обучающей выборке [11]. Этот подход представляется перспективным и имеет целый ряд преимуществ, главным из которых является адаптивная настройка ортогонального базиса по заданным параметрам.

Распознавание графиков функций  $f(t)$  низкочастотного отклика на внешнее ударное воздействие  $F$  при диагностике конструкций формально можно описать следующим образом. Каждый график  $f_i(t)$  рассматривается как вектор действительных значений  $\mathbf{f}_i = [f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}, \dots, f_{iN}]^T \in \mathbf{R}^N$  изменения отклика во времени. Шаг дискретизации  $\Delta t$  во времени или число отсчетов  $N$  на интервале наблюдения выбирается в соответствии с теоремой дискретизации [11].

Условно число векторов  $\mathbf{f}_i$  в исследуемой выборке  $\{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3, \dots, \mathbf{f}_n\} \in \mathbf{R}^{N \times n}$  определяется числом  $n$  распознаваемых дефек-

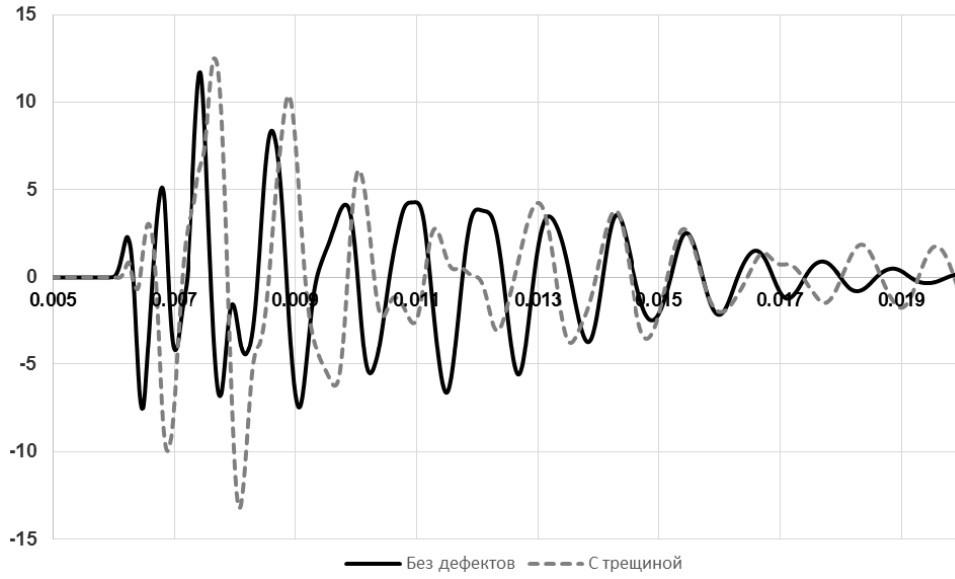


Рис. 2. Сравнение акселерограмм для образца без дефектов и образца, ослабленного трещиной

тов в конструкции. Изначально набор векторов  $\{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3, \dots, \mathbf{f}_n\}$  является линейнозависимым. Это объясняется избыточной размерностью  $N$  векторов  $\mathbf{f}_i$ , близостью форм графиков и подтверждается значением ранга матрицы  $\mathbf{f} = [\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3, \dots, \mathbf{f}_n]^T \in \mathbf{R}^{n \times N}$ , для которого справедливо неравенство  $\text{rank}(\mathbf{f}) \ll N$ .

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

$$\text{span} \{\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_m\} = \left\{ \sum_{j=1}^m \beta_j \xi_j : \beta_j \in \mathbf{R} \right\}.$$

При этом векторы  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_m$  образуют ортонормированный базис в  $\mathbf{R}^N$  и для матрицы  $\Xi$  верно  $\Xi^T \Xi = \mathbf{I}_m$ . Условно матрицу  $\Xi$  можно рассматривать как матрицу ортогонального сжатия линейного пространства  $\mathbf{R}^N$  в пространство  $\mathbf{R}^m$ . Векто-

ра  $\mathbf{f}_i \in \mathbf{R}^N$  откликов преобразуются с помощью  $\Xi$  в образы  $\mathbf{A}_i \in \mathbf{R}^m$  причем  $m < N$  и при этом вся исследуемая матрица откликов  $\mathbf{f}$  преобразуется в матрицу образов  $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, \dots, \mathbf{A}_n]^T \in \mathbf{R}^{n \times m}$ . В общем виде ортогональное разложение исходных векторов  $\mathbf{f}_i \in \mathbf{R}^N$  по базису  $\Xi$  можно представить в виде  $\mathbf{f}_i = \Xi \mathbf{A}_i + \mathbf{A}_0$ , где  $\mathbf{A}_0$  — постоянная составляющая преобразования.

Ортонормированный базис  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_m$  при этом является адаптивно настраиваемым, обучаемым и зависящим от распознаваемой выборки  $\{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3, \dots, \mathbf{f}_n\} \in \mathbf{R}^{N \times n}$ . При определении базиса решается комплекс оптимизационных задач, в частности:

- 1) Наилучшей воспроизводимости

$$\|\mathbf{f} - \mathbf{A} \Xi^T - \mathbf{A}_0\|_2 \rightarrow \min,$$

где  $\mathbf{A}_0 \in \mathbf{R}^{n \times N}$  — матрица постоянных составляющих преобразования, состоящая из векторов  $\mathbf{A}_0$ .

- 2) Ортонормированности базиса

$$\|\Xi^T \Xi - \mathbf{I}_m\|_2 \rightarrow \min.$$

- 3) Наилучшей различимости

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

Для простоты графической и физической интерпретации дефектоскопию образцов будем осуществлять по образам

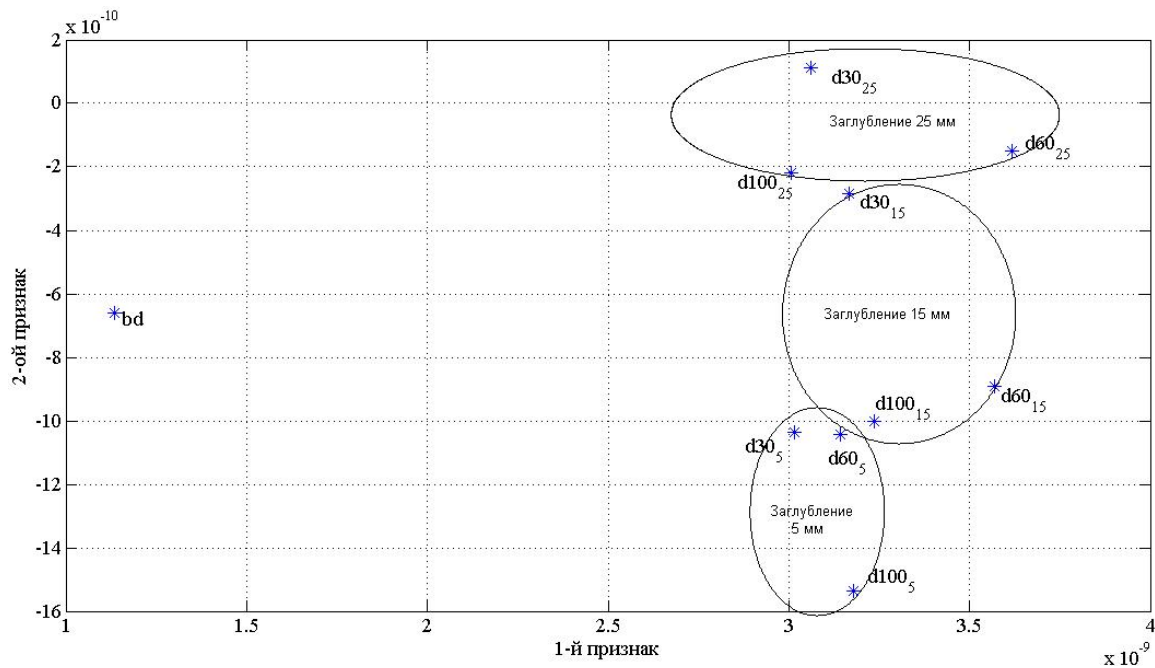


Рис. 3. Расположение образов в пространстве распознавания для образцов с трещинами различного размера и заглубления

$\mathbf{A}_i = (a_{i1}, a_{i2}) \in \mathbf{R}^2$  в двумерном признаковом пространстве. Как показали исследования, указанная размерность признакового пространства достаточна для проведения качественной диагностики образцов.

## 2. Результаты исследований и их обсуждение

В ходе исследования были проведены следующие эксперименты:

- 1) Исследование влияния размера неоднородности на возможность дефектоскопии.
- 2) Исследование влияния глубины залегания неоднородности на возможности дефектоскопии.

Рис. 3 показывает результаты построения признакового диагностического пространства и расположения образов для образца с трещиной различной длины (30, 60 и 100 мм) с различной глубиной залегания (5, 15 и 25 мм).

На рис. 3  $bd$  — образ для образца без дефектов,  $dL_h$  — образ для образца с трещиной (длина  $L$  и заглубление  $h$ ).

Результаты экспериментов показали, что имеет место четкое распределение образов в пространстве распознавания в зависимости от длины и глубины залегания трещины. Это подтверждает эффективность предложенного метода к повышению информативности сиг-

налов при решении задач определения скрытых дефектов.

## Выводы

- 1) Предложен биспектральный метод к обработке сигналов в задачах распознавания скрытых трещин по функции отклика на поверхности образца, основанный на адаптивно настраиваемом ортонормированном базисе.
- 2) Использование предложенного метода обеспечивает четкое распознавание размера и глубины залегания трещины в диагностическом пространстве образов, что может представлять интерес при решении задач определения скрытых дефектов.

## 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. 254 с.
3. Калинин В.В., Полякова И.Б. О вибрации штампа на поверхности предварительно напряженного полупространства // Прикладная механика. 1982. Т. 18. № 6. С. 22–27.
4. Белянкова Т.И., Калинин В.В. О взаимодействии осциллирующего штампа с предварительно напряженным полупространством //

- Прикладная математика и механика. 1993. Т. 57. № 4. С. 123–134.
5. Белянкова Т.И., Калинин В.В. Динамика массивного тела, взаимодействующего с предварительно напряженным полупространством // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 1994. № 6. С. 83–94.
  6. Ахтямов А.М., Каримов А.Р. Диагностирование полости в призматической балке // Дефектоскопия. 2013. № 3. С. 15–20.
  7. Bocharova O.V. On inverse problems of identification the cavity in the elastic cylinder // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 490. No. 1. P. 012057, doi:10.1088/1742-6596/490/1/012057.
  8. Есипов Ю.В., Мухортов В.М., Калинин В.В. Испытательная установка для анализа деформации моделей трехмерных конструкций // Измерительная техника. 2008. № 10. С. 39–42.
  9. Акопьян В.А., Черпаков А.В., Рожков Е.В., Соловьев А.Н. Интегральный диагностический признак идентификации повреждений в элементах стержневых конструкций // Контроль. Диагностика. 2012. № 7. С. 50–56.
  10. Бочарова О.В., Лыжов В.А., Анджигович И.Е. Некоторые особенности волновых полей на поверхности тел, ослабленных наличием дефектов // Вестник Южного научного центра РАН. 2013. Т. 9. № 2. С. 11–15.
  11. Седов А.В. Моделирование объектов с дискретно-распределенными параметрами: декомпозиционный подход. М.: Наука, 2010. 438 с.
  12. Бочарова О.В., Анджигович 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.
  13. Бочарова О.В., Седов А.В., Анджигович И.Е., Калинин В.В. О моделировании поверхностных волновых полей в средах с неоднородностями // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2015. № 4. С. 33–36.
  14. Бочарова О.В., Седов А. В., Анджигович 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.
  3. Kalinchuk V.V., Polyakova I.B. O vibratsii shtampa na poverkhnosti predvaritel'no napryazhennogo poluprostranstva [About the vibration die on the surface of the half-space prestressed]. *Prikladnaya mekhanika* [J. of Applied Mechanics], 1982, vol. 18, no. 6, pp. 22–27. (In Russian)
  4. Belyankova T.I., Kalinchuk V.V. O vzaimod-eystvii ostilliruyushchego shtampa s predvaritel'no napryazhennym poluprostranstvom [On the interaction of the oscillating die with prestressed half]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Applied Mathematics and Mechanics], 1993, vol. 57, no. 4, pp. 123–134. (In Russian)
  5. Belyankova T.I., Kalinchuk V.V. Dinamika massivnogo tela, vzaimodeystvuyushchego s predvaritel'no napryazhennym poluprostranstvom [Dynamics of a massive body interacting with a half-space prestressed]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Proc. of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of rigid body], 1994, no. 6, pp. 83–94. (In Russian)
  6. Akhtyamov A.M., Karimov A.R. Diagnostirovanie polosti v prizmaticheskoy balke [Diagnosing a cavity in a prismatic beam]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2013, no. 3, pp. 15–20. (In Russian)
  7. Bocharova O.V. On inverse problems of identification the cavity in the elastic cylinder. *J. of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 490, no. 1, p. 012057. doi: 10.1088/1742-6596/490/1/012057.
  8. Esipov Yu.V., Mukhortov V.M., Kalinchuk V.V. Ispytatel'naya ustanovka dlya analiza deformatsii modeley trekhmernykh konstruksiy [The test setup for the analysis of deformation of three-dimensional structural models]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 2008, no. 10, pp. 39–42. (In Russian)
  9. Akop'yan V.A., Cherpakov A.V., Rozhkov E.V., Solov'ev A.N. Integral'nyy diagnosticheskiy priznak identifikatsii povrezhdeniy v elementakh stержnevnykh konstruksiy [Integrated diagnostic feature in the identification of core damage structural elements]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2012, no. 7, pp. 50–56. (In Russian)
  10. Bocharova O.V., Lyzhov V.A., Andzhikovich I.E. Nekotorye osobennosti volnovykh poley na poverkhnosti tel, oslablennykh nalichiem defektov [Some features of wave fields on the surface of the body, weakened by the presence of defects]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN* [Bull. of the Southern Research Center of the RAS], 2013, vol. 9, no. 2, pp. 11–15. (In Russian)
  11. Sedov A.V. *Modelirovanie ob"ektov s diskretno-*

## References

1. Sharp R. (ed.) *Metody nerazrushayushchikh ispytaniy* [Methods of non-destructive testing]. Moscow, Mir Pub., 1972, 494 p. (In Russian)
2. Kershenbaum V.Ya. (ed.) *Nerazrushayushchie metody kontrolya* [Non-destructive testing meth-

- raspredelennymi parametrami: dekompozitsionnyy podkhod* [Modeling objects with discrete distributed parameters: decomposition approach]. Moscow, Nauka Pub., 2010, 438 p. (In Russian)
12. Bocharova O.V., Andzhikovich I.E., Vorovich E.I. К проблеме исследования поверхностных волновых полей с помощью тонкопленочных сегнетоэлектрических датчиков [To study the problem of surface wave fields using ferroelectric thin film sensors]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN* [Bull. of the Southern Research Center of the RAS], 2015, vol. 11, no. 1, pp. 30–35. (In Russian)
  13. Bocharova O.V., Sedov A.V., Andzhikovich I.E., Kalinchuk V.V. О моделировании поверхностных волновых полей в средах с неоднородностями [On the modeling of surface wave fields in media with inhomogeneities]. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2015, no. 4, pp. 33–36. (In Russian)
  14. Bocharova O.V., Sedov A. V., Andzhikovich I.E., Kalinchuk V.V. Об одном методе идентификации дефектов, основанном на контроле структуры и особенностях поверхностных волновых полей [A method for identifying defects, based on the control of the structure and characteristics of the surface wave fields]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2016, vol. 52, no. 7, pp. 21–28. (In Russian)

---

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2016

© Бочарова О. В., Седов А. В., Анджилович И. Е., Калинин В. В., 2016

Статья поступила 16 декабря 2016 г.