

**УДК 535.8**

**ББК 22.34**

**П121**

**П. В. Павлов**

**Воронеж, Россия**

**И. Э. Вольф**

**Воронеж, Россия**

**А. Н. Малов**

**Иркутск, Россия**

## **ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПЛЕКС НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Рассматриваются пути по реализации устройств неразрушающего контроля авиационных деталей, принцип действия которых основан на использовании метода спекл-структур оптического излучения. Представлены результаты натурных испытаний по практическому применению оптико-электронного комплекса неразрушающего контроля для оценки технического состояния остекления кабины самолета.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, оптико-электронные системы, корреляция, спекл, лазер.

**P. V. Pavlov**

**Voronezh, Russia**

**I. E. Wolf**

**Voronezh, Russia**

**A. N. Malov**

**Irkutsk, Russia**

## **THE OPTO-ELECTRONIC COMPLEX OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF AIRCRAFT COMPONENTS**

The authors discuss ways to implement the devices of non-destructive testing of aircraft components, whose operation is based on the method of optical radiation

speckle patterns. The article presents the results of field tests for the practical application of optoelectronic complex of non-destructive testing to assess the technical condition of the aircraft cockpit glazing.

**Key words:** non-destructive testing; optoelectronic systems; correlation; speckle; laser.

Модернизация существующих и разработка перспективных авиационных комплексов вооружения позволила расширить их диапазон применения, что непосредственно сказалось на увеличении нагрузок на конструкцию и все агрегаты воздушного судна в процессе эксплуатации. Одним из важных факторов, обуславливающих аварийность воздушных судов (ВС) государственной авиации РФ является несовершенство находящихся в строевых частях устройств неразрушающего контроля (НК).

Так, например, в основе стандартных дефектоскопических работ по осмотру поверхностей высоконагруженных деталей ВС лежит оптико-визуальный метод НК, следовательно, от его результатов будет зависеть дальнейшая безопасность полетов авиапарка Государственной авиации РФ. Основным недостатком такого оптического метода НК является влияние субъективного человеческого фактора на результат контроля и отсутствие возможности определения глубины повреждения (дефекта) детали [Канаевский, 2007, с. 48]. Таким образом, актуальна разработка новых, высокоточных устройств НК.

Наличие современной элементной базы оптоэлектроники – полупроводниковых лазеров, матричных фотоприемников, портативных компьютеров – позволило создать мобильный спекл-лазерный дефектоскоп. Принцип работы данного устройства основан на использовании метода спекл-структур оптического излучения (МССОИ) [Павлов, 2015, с. 21].

Физический смысл МССОИ состоит в следующем. Если освещать шероховатый предмет когерентным пучком излучения (от лазера), то изображение, которое наблюдается, либо глазом, либо при помощи оптической системы, имеет ярко выраженную зернистую структуру – спекл-картину. Характер и структура

спекл-картины полностью зависит от структуры облучаемой поверхности, поэтому при образовании мельчайшего дефекта (соизмеримого с длиной волны излучения) на контролируемой поверхности происходит изменение структуры спекл-изображений [ГОСТ Р 53696-2009, с. 3].

В настоящее время известен ряд областей, где применение МССОИ имеет большие перспективы: исследование материалов методом спекл-Структур [Клименко, 1984, с. 34], исследование состояния организма [Тучин, 1989, с. 41], исследование деформаций и напряжений в деталях [Владимиров, 2004, с. 25].

При использовании МССОИ применяются различные алгоритмы обработки цифровых спекл-изображений [Кульчин, 2009, с. 56]. Отсутствие специализированного программного комплекса, включающего в себя модули цифровой обработки изображений, не позволяло операторам, имеющим базовые навыки владения ЭВМ, проводить операции по НК с применением устройств, принцип действия которых основан на использовании МССОИ.

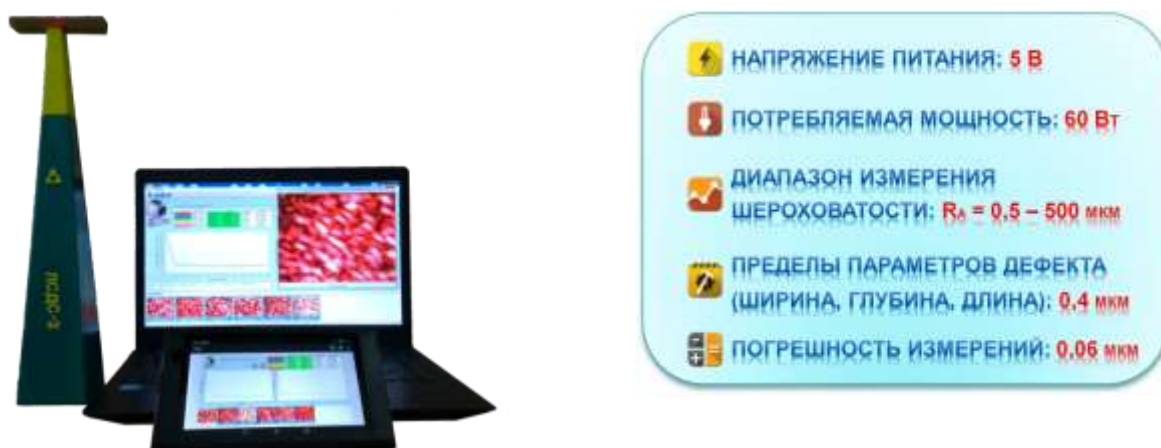


Рис. 1. Внешний вид и характеристики опико-электронного комплекса неразрушающего контроля

Бурное развитие микроэлектроники привело к тому, что на сегодняшний момент каждый мобильный гаджет является портативным вычислительным устройством, позволяющим производить серьезные математические вычисления, в том числе и выполнять операции по цифровой обработке изображений. Использование программного комплекса на портативных вычислителях, работающих на операционных системах (ОС) Android, Mac OS, Linux, Windows Phone, требует от разработчиков выбора кроссплатформенного языка програм-

мирования, позволяющего создавать программное обеспечение, совместимое с любой из рассмотренных выше ОС. Поэтому в качестве инструмента был выбран язык программирования Java SE, со средой разработки Eclipse.

Цель настоящей работы заключалась в разработке программного комплекса, способного расширить возможность устройств НК, принцип действия которых основан на использовании МССОИ, за счет оптимизации алгоритмов обработки цифровых спекл-изображений, увеличения эргономики среды обработки и выполнении комплексной оценки параметров контролируемых деталей по анализу параметров цифровых спекл-изображений.

Для извлечения полезной информации из спекл-изображений известны различные методы их цифровой обработки. Одним из таких методов является корреляционный анализ, который позволяет по ширине функции автокорреляции определить наличие дефекта на контролируемой поверхности.

Принцип работы алгоритма корреляционного метода состоит в циклическом сдвиге исходного спекл-изображения, относительно самого себя по оси координат ОХ, или ОУ, на шаг смещения равный одному пикселю. При каждом таком смещении рассчитывается коэффициент автокорреляции исходного изображения и смещенного по формуле (1), после выполнения всех сдвигов получается множество коэффициентов автокорреляции со значениями, изменяющимися от 1, что свидетельствует о полном сходстве обрабатываемых изображений при шаге смещения равным нулю, и до 0, что говорит о полном различии исходного и смещенного изображений. На завершающем этапе работы метода строится график автокорреляционной функции из рассчитанного множества коэффициентов автокорреляции, представленный на *рис. 2*:

$$r_{\tau} = \frac{(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t x_{t+\tau} - \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t \sum_{t=1}^{n-\tau} x_{t+\tau}}{\sqrt{(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t^2 - (\sum_{t=1}^{n-\tau} x_t)^2} \sqrt{(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} x_{t+\tau}^2 - (\sum_{t=1}^{n-\tau} x_{t+\tau})^2}}, \quad (1)$$

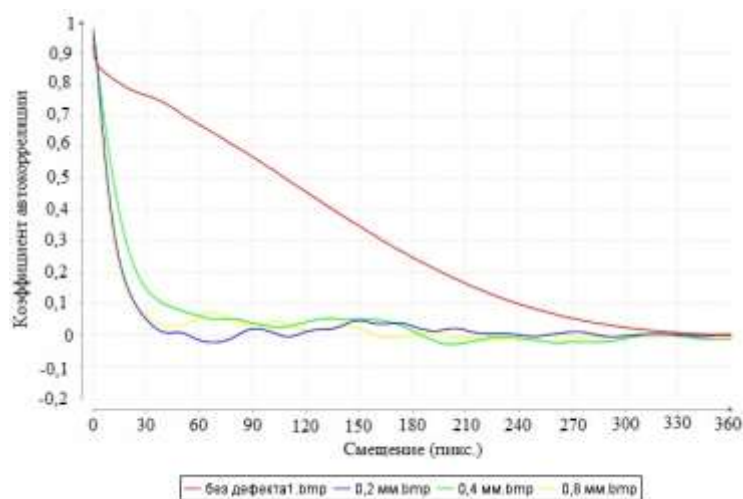


Рис. 2. Графики функций автокорреляции спекл-изображений

где  $x_t$  значение яркости пикселя в точке  $t$ ;  $x_{t+\tau}$  значение яркости пикселя в точке  $t$ , в момент смещения  $\tau$ ;  $n$  – количество пикселей,  $\tau$  – шаг смещения. Количество смещений соответствует размеру спекл-изображения, ширине, если производится смещение вдоль оси ОХ, и высоте, в случае смещения по оси ОУ.

При расчете коэффициентов энергетического спектра была реализована функция обратного дискретного Фурье преобразования:

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K X_k e^{\frac{-2\pi i k n}{K}}, \quad (2)$$

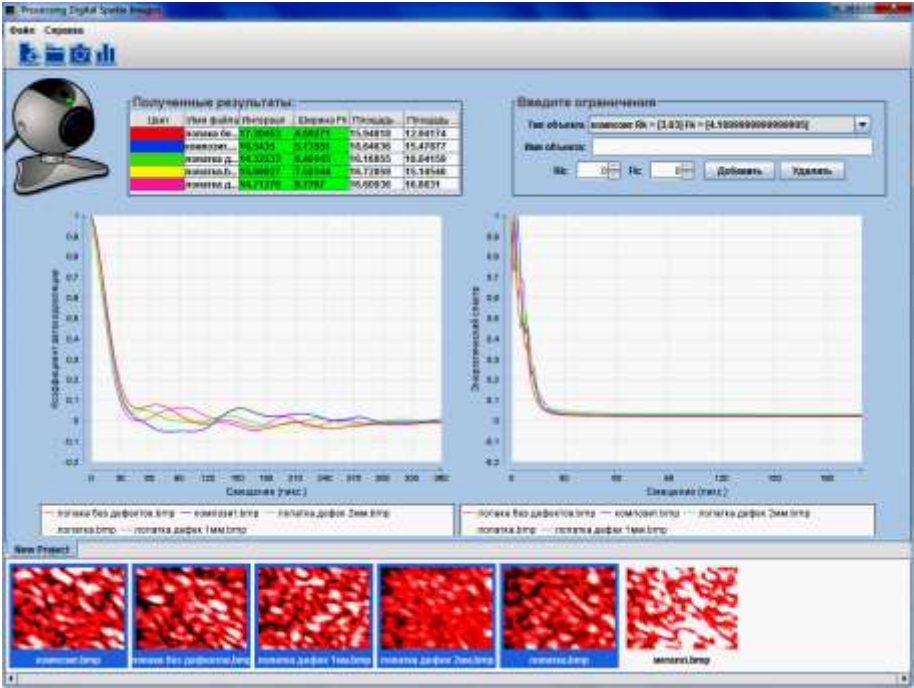
где  $N$  – количество значений корреляционной функции,  $K$  – множество значений корреляционной функции.

Данный метод позволяет в режиме реального времени проводить анализ параметров поверхности деталей, изготовленных из различных материалов, путём сопоставления рассчитанных характеристик с эталонными значениями, полученными в тот момент времени, когда поверхность детали не имела дефектов.

Для практической реализации предлагаемого способа обработки спекл-изображений был разработан программный модуль, реализованный на языке программирования Java Standard Edition в среде разработки Eclipse для операционной системы MS Windows, и на языке программирования Java Standard Edition в среде разработки Android Studio для операционной системы Android. Данный программный модуль позволяет производить захват спекл-изображений, производить расчет коэффициентов автокорреляционной функ-

ции и энергетического спектра, строить соответствующие графики этим функциям, сравнивать эталонные значения с полученными значениями ширины функций автокорреляции и энергетического спектра.

При разработке программного продукта главной целью было: создать как можно проще и интуитивно понятнее интерфейс, с учетом возможного невысокого уровня подготовки оператора, с учетом всех требований. Интерфейс программного модуля представлен на *рис. 3*.



*Рис. 3.* Пример работы программного модуля корреляционной обработки цифровых спекл-фотографий для настольных систем MS Windows

На *рис. 4* представлена и увеличена таблица полученных результатов.

| Полученные результаты: |              |              |           |             |             |
|------------------------|--------------|--------------|-----------|-------------|-------------|
| Цвет                   | Имя файла    | Интервал ... | Ширина Fk | Площадь ... | Площадь ... |
| Красный                | лопака бе... | 17.30453     | 4.59271   | 15.94818    | 12.94174    |
| Синий                  | комполит...  | 16.5435      | 5.73551   | 18.64036    | 15.47877    |
| Зеленый                | лопатка д... | 14.32233     | 8.40143   | 16.16855    | 18.04159    |
| Желтый                 | лопатка.б... | 15.99027     | 7.58144   | 16.72859    | 15.14546    |
| Фиолетовый             | лопатка д... | 14.71276     | 8.7767    | 16.60936    | 16.6031     |

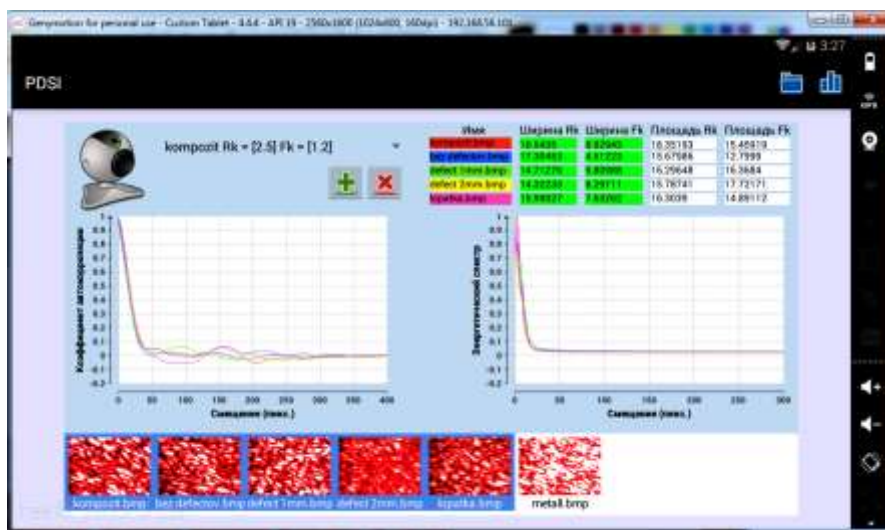
*Рис. 4.* Полученные результаты программного модуля корреляционной обработки цифровых спекл-фотографий для настольных систем MS Windows

В колонке «Цвет» изображен цвет, соответствующий оттенку графика обработанного изображения, в колонке «Имя файла» представлено имя изображения, для которого производились расчеты, в следующих 4-х колонках представлены результаты расчетов следующих функций: интервала автокорреляционной функции

$R_k$ , ширины энергетического спектра  $F_k$ , площади автокорреляционной функции и площади энергетического спектра. Колонки с интервалами  $R_k$  и  $F_k$  подсвечиваются зеленым в случаях, когда их расчетная величина не превышает допустимого значения, установленного оператором, что означает отсутствие дефекта на зондируемых поверхностях, в противном случае данные поля будут подсвечены красным цветом.

Стремление в современном мире к упрощению конструкций приборов привело к решению создания более мобильного спекл-лазерного дефектоскопа. Суть доработки заключалась в замене канала передачи данных между дефектоскопом и аппаратно программным комплексом с USB-шины на технологию беспроводной передачи данных. Вместе с данной доработкой был разработан аппаратно программный комплекс для операционной системы Android, разработка которого велась на языке программирования Java, в среде разработки Android Studio, в роли экспериментального устройства выступал эмулятор портативных устройств на ОС Android, Genymotion, который работает совместно с Oracle VM VirtualBox.

В силу ограниченности системных ресурсов на портативных устройствах, работающих с ОС Android, была произведена оптимизация кода функций расчета коэффициентов автокорреляции и энергетического спектра. Интерфейс программы не потерпел серьёзных изменений и представлен на *рис. 5*.



*Рис. 5.* Интерфейс программного комплекса автокорреляционной обработки цифровых спекл-фотографий для портативных устройств Android

Таким образом, разработанный программный комплекс обработки цифровых спекл-фотографий совместим с ОС MS Windows и Android, позволяет автоматизировать процесс дефектоскопического контроля с использованием мобильного спекл-лазерного дефектоскопа, а так же проводить работы по исследованию технических путей построения оптических средств неразрушающего, принцип действия которых основан на использовании МССОИ.

Разработанный оптико-электронный комплекс позволяет производить контроль технического состояния поверхностей, изготовленных из различных материалов.

Для демонстрации работы комплекса был выбран фонарь кабины самолета МиГ-31, на его поверхности были обнаружены микротрещины, которые и стали объектами для исследований. Диагностика остекления фонаря кабины самолета производится в несколько этапов – на первом этапе проводится визуальный осмотр всего фонаря кабины самолёта и выявляются очаги образования микротрещин («серебро») (*рис. 6, а*). На следующем этапе проводится сканирование обнаруженных очагов образования микротрещин с помощью лазерного спекл-дефектоскопа (*рис. 6, б*). После завершения сканирования полученные спекл-изображения передаются в разработанный программный комплекс, в котором производится их обработка и автоматически делается вывод о наличии дефекта на исследуемой поверхности, с использованием автокорреляционного метода обработки спекл-изображений.

Во время эксперимента были получены несколько спекл-изображений с поверхности фонаря самолета МиГ-31 без дефектов (*рис. 7, а*) и с наличием микротрещин (*рис. 7, б*).

Методом автокорреляционного анализа были получены результаты, отображенные в *табл. 1*.



Рис. 6. Практическое применение оптико-электронного комплекса неразрушающего контроля

а) – фрагмент элемента остекления боевого воздушного судна с цепочкой повреждений типа «серебро», б) – регистрация спекл-изображений от контролируемого участка фонаря

Таблица 1. Результаты эксперимента

| Имя изображения | Интервал автокорреляции | Ширина энергетического спектра |
|-----------------|-------------------------|--------------------------------|
| Без дефекта     | 51,497                  | 1,233                          |
| С дефектом      | 15,617                  | 2,214                          |

Из табл.1 видно, что интервал функции автокорреляции изображения с наличием микротрещин значительно уменьшился, по сравнению с изображением без дефектов, что наглядно видно на графике автокорреляционной функции рис. 8.

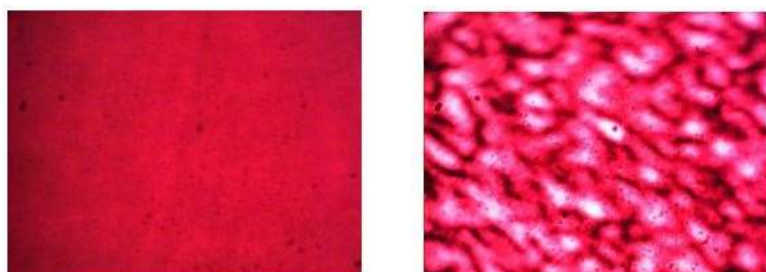


Рис. 7. Спекл-изображения зарегистрированные с поверхности фонаря кабины самолета МиГ-31:

а – без дефектов; б – при наличии микротрещин («серебро»)

На основе полученных данных программа автоматически делает вывод о наличии или отсутствии на поверхности микротрещин.

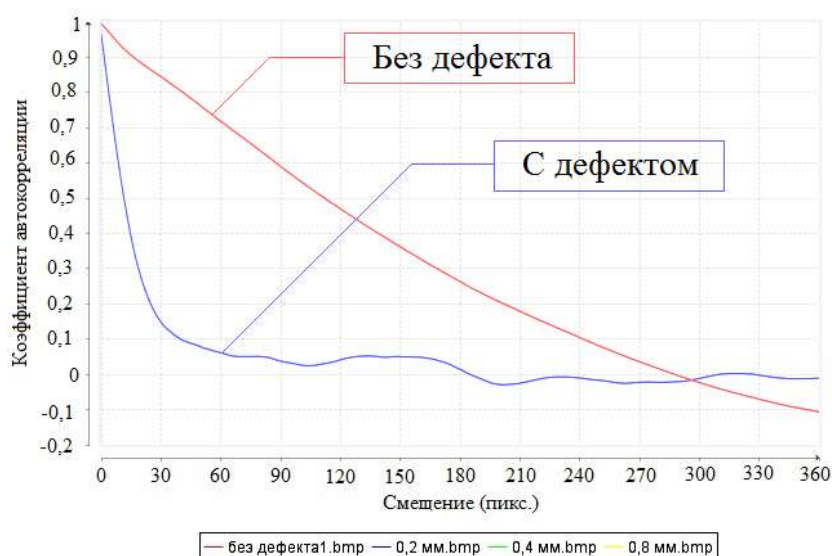


Рис. 8. График функций автокорреляций регистрируемых спекл-изображений

Таким образом, внедрение разработанного оптико-электронного комплекса НК позволит проводить дефектоскопический контроль узлов и агрегатов воздушного судна, по анализу параметров цифровых спекл-изображений с использованием базы данных эталонных значений повреждений, а также отслеживать динамику изменения параметров дефектов и определять остаточный ресурс силовых элементов конструкции в процессе эксплуатации воздушного судна. Преимуществом данного комплекса является его мобильность, возможность производить технический контроль инженерно-техническим составом, имеющим базовые навыки владения компьютером, отсутствие влияния человеческого фактора на конечный результат контроля, что позволит уменьшить ошибку при диагностике силовых элементов конструкции воздушного судна.

### Библиографический список

1. Владимиров А. П. Динамическая спекл-интерферометрия деформируемых тел. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 241 с.
2. ГОСТ Р 53696-2009 Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. М.: Стандартинформ. 2010. 7 с.
3. Канаевский И. Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие / И. Н. Канаевский, Е. Н. Сальникова. Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2007. 243 с.

4. *Клименко И. С.* Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука. 1985. 224 с.
5. *Кульчин Ю. Н.* Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей / Ю. Н. Кульчин, О. Б. Витрик, А. А. Камшилин, Р. В. Ромашко. М.: Физматлит, 2009. 288 с.
6. *Павлов П. В.* Аппаратно-программный комплекс неразрушающего контроля авиационных деталей / П. В. Павлов, А. Е. Горюнов // Труды МАИ. 2015. № 80. С. 21.
7. *Тучин В. В.* Лазерная диагностика в биологии и медицине. М.: Наука. 1989. 237 с.
8. Физика наукоемких технологий. Спекл-оптические методы исследования шероховатых поверхностей и подповерхностной структуры объектов / А. Н. Бородин, А. А. Вайчас, А. Н. Малов [и др.]. Выпуск 2. Иркутск: ИВВАИУ, 2008. С. 5–71.

## References

1. *Vladimirov A. P.* (2004). Dynamic speckle interferometry of deformable bodies. Ekaterinburg: URD RAS, 2004. 241 p. (In Russian).
2. GOST R 53696-2009 Non-destructing testing. Optical methods. Terms and definitions. М.: Standartinform. 2010. 7 p. (In Russian).
3. *Kanaevskij I. N.* (2007). Methods of non-destructing testing: textbook / I. N. Kanaevskij, E. N. Sal'nikova. Vladivostok: FEGTU. 2007. 243 p. (In Russian).
4. *Klimenko I. S.* (1985). Focused-image holography and speckle interferometry. М.: Science. 1985. 224 p. (In Russian).
5. *Kul'chin Ju. N.* (2009). Adaptive methods of processing speckle-modulated optical fields / Ju. N. Kul'chin, O. B. Vitrik, A. A. Kamshilin, R. V. Romashko. М.: Physmathlit, 2009. 288 p. (In Russian).
6. *Pavlov P. V.* (2015). Hardware and software complex of non-destructing testing of aircraft components / P. V. Pavlov, A. E. Gorjunov // Works of MAI. 2015. № 80. P. 21. (In Russian).
7. *Tuchin V. V.* (1989). Laser diagnostics in biology and medicine. М.: Science. 1989. 237 p. (In Russian).
8. Physics of high technologies. Speckle-optical methods of research of roughened surfaces and subsurface structures of objects / A. N. Borodin, A. A. Vajchas, A. N. Malov [et al.]. Issue 2. Irkutsk: IHMAES, 2008. P. 5–71. (In Russian).