

Научная статья

УДК 535.34

DOI: [10.34759/trd-2023-129-23](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-23)

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СПЕКЛ-ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ОСТЕКЛЕНИЯ КАБИН САМОЛЕТОВ

**Анатолий Романович Степанов¹, Павел Владимирович Павлов²✉, Александр
Петрович Владимиров³**

^{1,2}Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А.
Гагарина, Воронеж, Россия

³Уральский Федеральный Университет имени Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия

³Институт машиноведения УрО РАН имени Э.С. Горкунова,
Екатеринбург, Россия

²pavlov.pave@yandex.ru ✉

³vap52@bk.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследований, направленных на разработку способа и устройства определения технического состояния элементов остекления кабин воздушных судов (ВС). Рассмотрены технические пути построения оптико-электронной системы неразрушающего контроля, способной определять величину перемещения элементов остекления самолета в ходе изменения избыточного давления внутри кабины ВС. В качестве инструмента неразрушающего контроля предлагается использовать метод спекл-структур оптического излучения,

принцип действия которого основан на определении величины перемещения элементов остекления по анализу изменения параметров регистрируемых спекл-полей. Для практической реализации предложенного способа разработана оснастка для установки и зондирования спекл-полем участков остекления кабины ВС, а также программный модуль регистрации и обработки регистрируемых спекл-полей для последующей выдачи оператору величины перемещения контролируемых участков остекления при создании избыточного давления внутри кабины. Представлены результаты натурных испытаний экспериментального образца разработанного аппаратно-программного комплекса (АПК) в ходе определения герметичности кабин самолетов по анализу изменения величины выходов остекления из заделки. Результаты испытаний подтвердили заявленную возможность в определении величины выхода остекления из заделки с помощью разработанного АПК. Применение комплекса в ходе эксплуатации авиационной техники позволит существенно снизить экономические затраты, значительно уменьшить число допускаемых ошибок при определении величины выхода остекления из заделки и повысить вероятность определения разрушения клеевого соединения внутри заделки.

Ключевые слова: спеклы, остекление, выход из заделки, неразрушающий контроль, дефект, кабина

Для цитирования: Степанов А.Р., Павлов П.В., Владимиров А.П. Аппаратно-программный комплекс спекл-лазерной диагностики элементов остекления кабин самолетов // Труды МАИ. 2023. № 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-23](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-23)

Original article

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX SPECKLE LASER DIAGNOSTICS OF AIRCRAFT CABIN GLAZING ELEMENTS

Anatoliy R. Stepanov¹, Pavel V. Pavlov²✉, Alexander P. Vladimirov³

^{1,2}Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovskiy and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russia

³Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

³Institute of Engineering Science Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

²pavlov.pave@yandex.ru✉

³vap52@bk.ru

Abstract. The article presents the results of the research oriented to developing a method and device for technical condition determining of the aircraft cabins glazing elements. Technical ways of constructing an optoelectronic non-destructive testing system capable of determining the amount of movement of aircraft glazing elements during changes in excess pressure inside the cabin of the aircraft are considered. The authors propose employing the speckle structures method of optical radiation, which operating principle is based on determining the glazing elements displacement by the parameters changing analysis of the speckle fields being recorded, as a non-destructive control tool. The rigging for installing and sensing the glazed parts of the aircraft cabin with the speckle field was developed for practical realization of the said method. The program module for the speckle fields being registered recording and processing with subsequent issuing the amount of the controlled cabin glazing section displacement at the excessive pressure occurrence in the

cabin was developed as well. The article presents the results of the full-scale tests of the pilot sample of the developed hardware-software complex while the aircraft cabin tightness determining by analyzing the changes in the number of cases of glazing escaping from the sealing.

The test results confirmed the claimed possibility of determining the size of the glazing escape from the sealing with the developed hardware and software complex. Application the complex during the of aviation equipment operation will significantly reduce economic costs and the number of errors in determining the size of the glazing escape from the sealing s well as increase the probability of determining the of the adhesive joint destruction inside the sealing.

Keywords: speckles, glazing, exit from sealing, non-destructive testing, defect, cabin

For citation: Stepanov A.R., Pavlov P.V., Vladimirov A.P. Hardware and software complex speckle laser diagnostics of aircraft cabin glazing elements. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-23](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-23)

Введение

Анализ авиационных происшествий и инцидентов, связанных с разрушением элементов остекления кабин самолетов в полете связаны с появлением дефектов в структуре стекла и нарушением клеевого соединения в заделке. Стоящие на вооружении методы и устройства неразрушающего контроля не позволяют определять состояние клеевого соединения и своевременно обнаружить неисправность.

Таким образом, **целью** работы является повышение безопасности полетов авиапарка Государственной авиации РФ за счет разработки и внедрения в эксплуатацию оптико-электронных систем неразрушающего контроля, позволяющие своевременно определять недопустимые дефекты внутри заделки остекления кабины и тем самым предотвращать случаи разрушения остекления в полете.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ возможностей современных методов и устройств неразрушающего контроля элементов остекления кабин воздушных судов.

2. Разработать новый способ неразрушающего контроля, позволяющий определять внутренние дефекты клеевого соединения в заделке остекления при создании избыточного давления внутри кабины воздушного судна.

3. Разработать аппаратную и программную часть устройства, позволяющего реализовать предложенный способ неразрушающего элементов остекления кабин самолетов.

4. Провести натурные испытания разработанного экспериментального образца АПК в ходе определения величины выхода остекления из заделки при проверке герметичности кабин самолетов.

1. Анализ современных методов и устройств неразрушающего контроля элементов остекления кабин воздушных судов

На сегодняшний момент состояние клеевого соединения оценивают «ленточным методом» путем определения величины перемещения бумажных индикаторов,

установленных на заданных участках остекления кабины при увеличении избыточного давления в кабине ВС. Также ранее был предложен способ, принцип действия которого основан на методе акустической эмиссии [1]. Недостатком данного способа является отсутствие возможности определения величины перемещения элементов остекления при создании избыточного давления внутри кабины.

Для повышения эффективности дефектоскопического контроля элементов остекления предлагается использовать оптико-электронные системы неразрушающего контроля [2, 3], принцип действия которой основан на использовании метода спекл-структур оптического излучения, который ранее был использован для диагностики внутренней и поверхностной структуры авиационного органического стекла [4-7]. Однако для использования данного метода при определении внутренних дефектов в заделке остекления кабины воздушного судна требуется доработка как аппаратной части оптико-электронной системы, так и программного обеспечения, предназначенного проводить расчеты величины выхода остекления из заделки по анализу параметров регистрируемых цифровых спекл-фотографий.

Таким образом, разработка прецизионного способа и устройства для определения величины выходов элементов остекления из заделки при создании избыточного давления внутри кабины является актуальной научно-практической задачей.

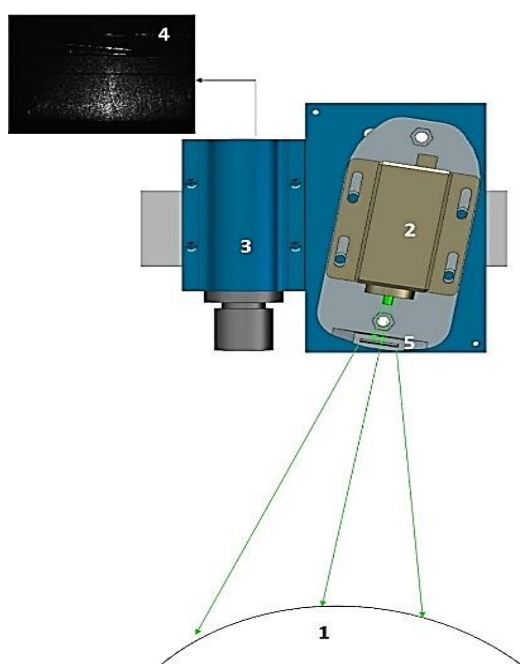
2. Разработка способа определения дефектов в заделке остекления кабины воздушного судна с использованием метода спекл-структур оптического излучения

Для определения дефектов внутри заделки остекления предлагается использовать метод спекл-структур оптического излучения, принцип действия которого основан на анализе параметров спекл-картин, регистрируемых при отражении когерентного излучения от поверхности остекления кабины воздушного судна. Высокая чувствительность метода спекл-структур оптического излучения была доказана ранее многими авторами при оценки состоянии поверхностной и внутренней структуры материалов [7-12], при изменении структуры материалов в ходе многоциклового усталости [13], и определении параметров движения объектов [14-17]. Указанные исследования позволили в настоящей работе разработать инструмент, с помощью которого стало возможным определить степень выхода остекления из заделки даже при незначительных нагрузках, и тем самым оценить характеристики клеевого соединения внутри заделки между лавсановой лентой и фторорганическим стеклом.

Реализация предлагаемого способа, заключается в плавном создании избыточного давления в кабине до заданной величины, поддержании его в течение некоторого времени и определении наличия дефекта в заделке остекления, по анализу изменения параметров спекл-полей зарегистрированных от контролируемых участков остекления до и после создания избыточного давления. При превышении разности параметров критического значения принимают решение

о наличии дефекта в заделке остекления кабины воздушного судна в данной точке и оценивают степень выхода остекления из заделки.

При нарушении по какой-либо причине поверхности объекта или его перемещения изменяются амплитуды и фазы отраженных волн, следовательно, изменяется и картина спеклов. Изменение амплитуд и фаз волн может быть обусловлено перемещением объекта как целого и его жестким поворотом или малыми изменениями расстояний между площадками вследствие упругих деформаций поверхности. Следует отметить, что картину спеклов можно сформировать и при изучении объектов с зеркальной поверхностью, а также прозрачных объектов, осветив их через матовое стекло, как показано на Рис. 1.



1 – остекление; 2 – лазер; 3 – видеокамера; 4 – картина спеклов;

5 – матовое стекло

Рис. 1 – Процесс регистрации картин спеклов с остекления кабины

Таким образом, по характеру изменения картины спеклов становится возможным изучать и контролировать явления, происходящие на поверхности или вблизи поверхности отражающих тел или внутри прозрачных сред.

3. Теория

В работе количественные оценки проводили на основе формул, полученных при решении задачи динамики спеклов в плоскости изображения деформируемых тел [18,19]. Согласно теории, предполагается, что в общем случае картина спеклов изменятся за счет трёх процессов:

- медленного поступательного перемещения образца вдоль оси OX ;
- периодического колебания образца также вдоль оси OX с фиксированной амплитудой и периодом T ;
- случайного изменения оптических путей волн, зондирующих объект исследования.

Согласно выбранной модели (Рис. 2), волны, которые имеют случайную начальную фазу, вначале распространяются от точечных рассеивающих центров (Рис. 2а), расположенных в области отражающего объекта диаметром $2a_s$, либо проходят через область прозрачного объекта диаметром $2a_s$ с центром в точке b (Рис. 2б), где $2a_s$ – линейное разрешение линзы.

Если принять, что все случайные величины независимы, а случайные значения разностей фаз пар волн коррелированы во времени, получено выражение для средней по времени интенсивности \tilde{I} излучения и нормированной временной

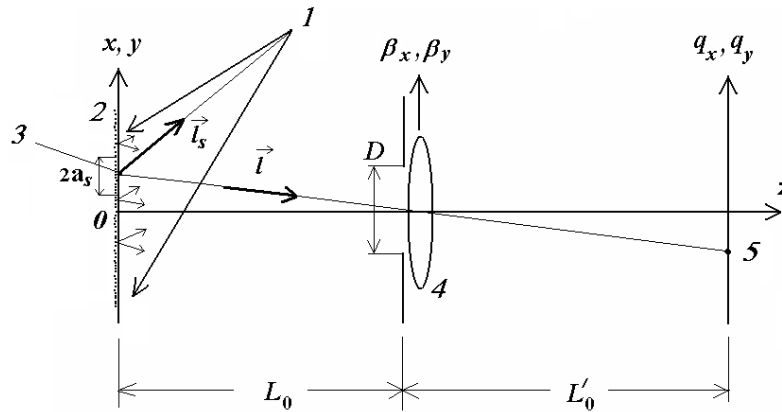
функции автокорреляции $\eta_{12}(t_1, t_2)$ этой интенсивности в произвольной точке q плоскости наблюдения, будут равны:

$$\eta(t_1, t_2) = \eta(u_x) \cos[\langle k\Delta u_2 \rangle - \langle k\Delta u_1 \rangle] e^{-\frac{1}{2}k_{11} - \frac{1}{2}k_{22} + k_{11}\rho_{12}(t_1, t_2)}, \quad (1)$$

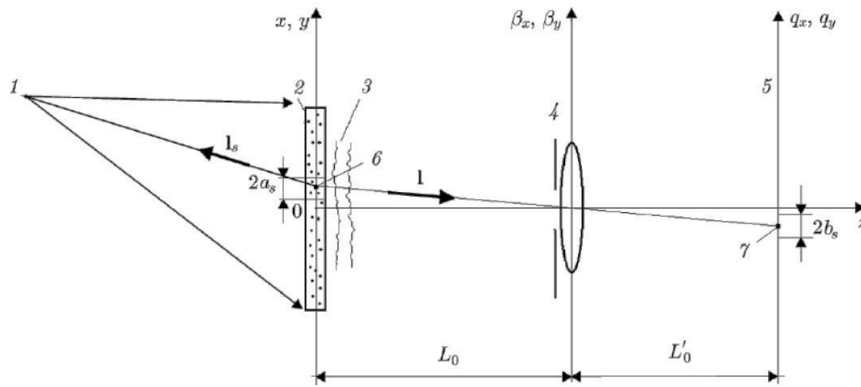
Для отражающего объекта $\Delta u = \Delta \vec{u}(\vec{l}_s + \vec{l})$, тогда:

$$\eta(u_x) = (2a_s - u_x)/2a_s, \quad (2)$$

где $\eta(u_x)$ – нормированная автокорреляционная функция, соответствующая поступательному перемещению u_x объекта, $\Delta \vec{u}$ – вектор относительного перемещения двух центров рассеяния, расположенных в пределах области диаметром $2a_s$ на среднем, характерном расстоянии Δy , \vec{l}_s и \vec{l} – единичные векторы, задающие направления освещения и наблюдения.



- а) 1 – освещающий пучок, 2 – центры рассеяния, 3,5 – точки, 4 – тонкая линза с диафрагмой,



б) 1 – освещающий пучок; 2 – диффузор; 3 – фазовый объект; 4 – тонкая линза с диафрагмой; 5 – плоскость изображения; 6, 7 – точки

Рис. 2 – Модели оптических систем и обозначения: а) отражающего б) прозрачного деформируемого объектов

Для прозрачного объекта с однородной шероховатой поверхностью $\Delta u = \Delta n L$, где Δn – разность показателя преломления на базе Δu , а

$$\eta(u_x) = \exp\left[-\tilde{\rho}_{11} - \tilde{\rho}_{12} \cos^2(u_x)\right], \quad (3)$$

где величины $\tilde{\rho}_{11}$ и $\rho_{12}(u_x)$ имеют тот же смысл, что и k_{11} и $\rho_{12}(t_1, t_2)$, однако они характеризуют изменение оптических путей пар волн, возникающее только из-за движения шероховатой поверхности.

Коэффициент корреляции η находился по формуле:

$$\eta = \frac{\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{ij} - \bar{A})(B_{ij} - \bar{B})}{\left(\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{ij} - \bar{A})^2\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (B_{ij} - \bar{B})^2\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (4)$$

где i, j – номера элементов (пикселей) строки и номера строк матрицы соответственно, n, m – число пикселей строки и число строк матрицы, A_{ij} – числовое

значение пикселя с номерами i и j при t_1 , B_{ij} – числовое значение этого пикселя в момент времени t_2 , \bar{A} – среднеарифметическая величина числовых значений элементов матрицы при t_1 , B_0 – среднеарифметическая величина числовых значений элементов матрицы в момент времени t_2 .

Таким образом, при использовании МССОИ в качестве параметра, по которому возможно оценить состояние остекления, а так же его движение в ходе создания избыточного давления внутри кабины, можно использовать коэффициент корреляции η . При создании избыточного давления имеет место перемещение непрозрачной части остекления (слой герметика на стыке корпуса самолета и стекла), а также прозрачного стекла относительно корпуса самолета. Величина перемещения непрозрачной части остекления в отсутствие деформаций и поворотов согласно формуле (2) будет соответствовать линейному разрешению линзы, если значение η станет равным нулю. Влияние деформаций на величину η можно исключить, выбрав направления освещения и наблюдения симметрично нормали поверхности, однако влияние макроскопического поворота поверхности в любом случае остается. В этом случае для разделения двух вкладов на динамику спеклов, последние следует регистрировать, используя два лазера с разными длинами волн.

Поскольку прозрачная часть остекления имеет слабую шероховатость, то зависимость $\eta(u_x)$ будет определяться формулой (3). Тогда при освещении остекления через матовое стекло телекамера будет регистрировать свет, отраженный как от внешней, так и внутренней поверхности оптического стекла. Тогда при перемещении остекления на расстояние, большее, чем характерный размер $\Delta\tilde{}$ оптической

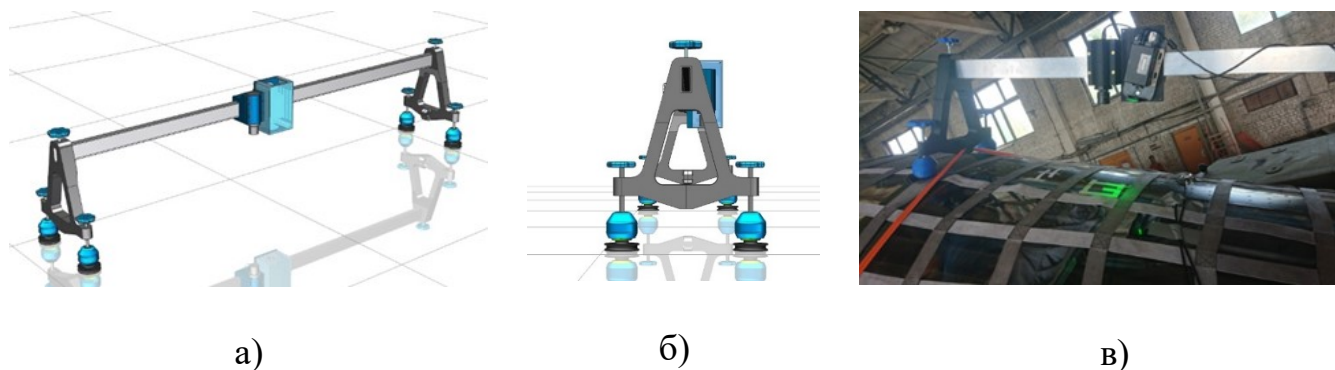
неоднородности стекла, величина η выйдет на постоянный уровень. По значению этого уровня и $\Delta\tilde{}$ можно оценить среднеквадратические отклонения $\sigma_{\Delta u}$ и $\sigma_{\Delta n}$ величин Δu и Δn соответственно. По двум кадрам спекловых изображений, взятых до и после перемещения на расстояние, превышающее $\Delta\tilde{}$, можно получить распределение η в плоскости изображения остекления, позволяющее визуализировать оптические неоднородности. Согласно [18,19], если значение η , достигло нуля или стало отрицательным, то материал перешел в состояние предразрушения. Величины $\sigma_{\Delta u}$, $\sigma_{\Delta n}$, а также минимальное значение η в оптической неоднородности, зарегистрированные до и в процессе эксплуатации остекления, можно использовать в качестве параметров, характеризующих их поврежденность.

4. Аппаратная часть оптико-электронной системы спекл-лазерного контроля элементов остекления кабин самолетов

Изготовление оснастки оптико-электронной системы для установки оптико-электронной системы на кабину воздушного судна проводилась с использованием аддитивных технологий по разработанной компьютерной модели с учетом особенностей реализации предлагаемого способа и с соблюдением требований виброизоляции оптической системы.

Оптическая система комплекса (Рис. 3). включает в себя элементы оптоэлектроники, предназначенные для генерирования когерентного оптического излучения на длине волны $\lambda = 532 \text{ нм}$ – полупроводниковый одномодовый лазер SLM-417, мощностью 20 мВт, матовой стекло, для формирования спекл-поля,

цифровую видеокамеру SDU-415C с объективом с изменяемой диафрагмой и разрешением ПЗС-матрицы Sony ICX415AL 768×576 пикселей и размером пикселя $8,3 \times 8,3$ мкм.



а) – внешний вид компьютерной модели; б) – опора; в) – размещение АПК на кабине

Рис. 3 – Аппаратная часть АПК

Опоры оснастки имеют подвижное основание, так как конструктивно представляют собой шаровой механизм, а использование присосок и удерживающих ремней позволяет устанавливать аппаратную часть комплекса на поверхности кабины сложной формы.

5. Программный модуль определения величины выхода остекления из заделки по анализу параметров регистрируемых спекл-полей

Программно-вычислительная часть АПК построена на использовании алгоритмов динамической обработки спекл-полей, что позволяет определять величину перемещение элементов остекления кабины самолета с учетом выбора сектора кабины на зарегистрированном спекл-поле [20]. Для разработки программного модуля был выбран язык программирования Java SE, со средой

разработки Eclipse, так как он кроссплатформен, а, следовательно, инструмент обработки спекл-полей может быть использован на вычислительных устройствах с различными операционными системами.

Рабочий вариант интерфейса разработанного программного модуля представлен на Рис. 4, он позволяет с помощью поля 1 извлекать из памяти вычислительного устройства зарегистрированные спекл-изображения от участков остекления или регистрировать и обрабатывать их в реальном масштабе времени.

Зарегистрированные спекл-изображения от контролируемых участков остекления размещаются в рабочем поле 9 для дальнейшей обработки и выдачи оператору величины перемещения 10 выделенного сектора 4 на зарегистрированном спекл-изображении 2 с учетом заданных параметров оптической системы 8. Кроме этого программный модуль может графически отображать оператору распределение значений коэффициентов корреляций каждого сектора 6 при изменении избыточного давления внутри кабины. Размеры секторов на которое будет разбиваться зарегистрированное спекл-изображение задаются оператором в поле 5.

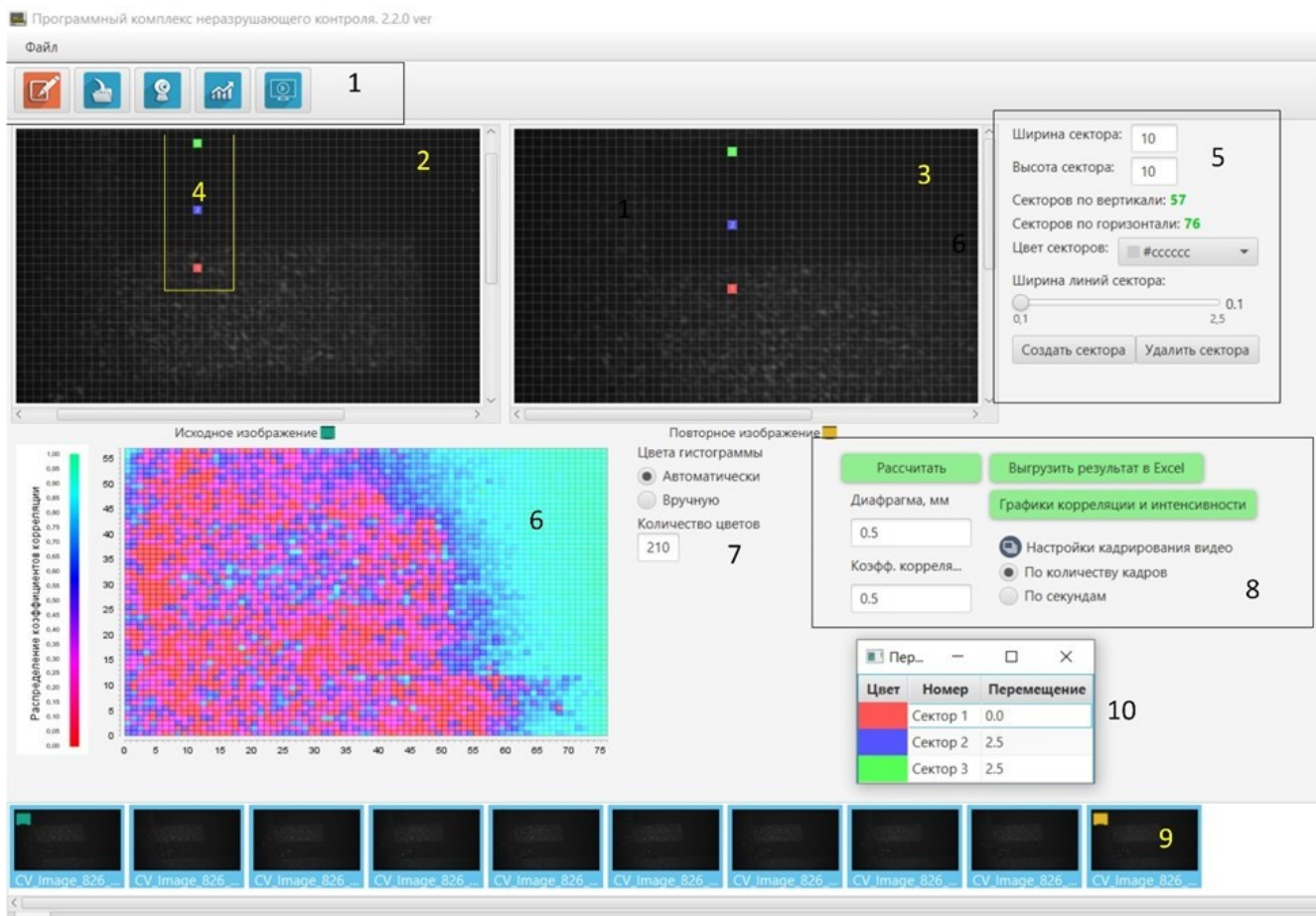


Рис. 4 – Интерфейс программного модуля определения величины перемещений элементов остекления

Цветовая градация коэффициента корреляции от 0...1 может выбираться вручную, так и автоматически, путем активации поля 7, а также сохраняться для документирования результатов измерений отдельным файлом с расширением .xls.

6. Результаты испытаний экспериментального образца АПК в ходе определения величины выхода остекления из заделки при проверке герметичности кабин самолетов

Натурные испытания разработанного АПК проходили в войсковой части оперативно тактической авиации, вооруженными самолетами, регламентом технической эксплуатации которых предусмотрено через определенный налет оценивать степень герметичности кабины и определять величину выходов остекления кабины из заделки.

Испытание АПК СЛК начиналось с подготовительных работ, которые заключались в определении координат мест с максимальным значением выхода остекления из заделки согласно «Журнала учета контроля технического состояния элементов остекления кабин», настройки оптической системы и установки оснастки на кабину самолета, юстировки и установки параметров (диафрагма, экспозиция) цифровой видеокамеры для регистрации картины спеклов от участков контролируемой поверхности остекления. При юстировке оптической системы производилась регистрация участка облучаемой поверхности остекления, включающая 3 объекта (центральная балка, герметик и остекление), для определения изменения динамики спеклов с последующей оценкой перемещения данных объектов при создании избыточного давления внутри кабины.

Для определения четких границ контролируемого участка остекления, а также осуществления оптического контроля перемещений центральной балки, герметика и

остекления контур контролируемого участка остекления перед зондированием обклеивался контрастной белой лентой (Рис. 5).

Каждый подготовительный этап заканчивался оценкой стабилизации оптической системы путем записи картины спеклов в течении одной минуты с частотой 1 кадр/секунды с последующей их корреляционной обработкой.

Перед каждым измерением после установки аппаратной части АПК СЛК осуществлялась оценка оптической стабилизации, оптическая система считалась стабильной и готовой к измерениям, если коэффициент корреляции в течение 30 секунд $\geq 0,9$ (голубой цвет).

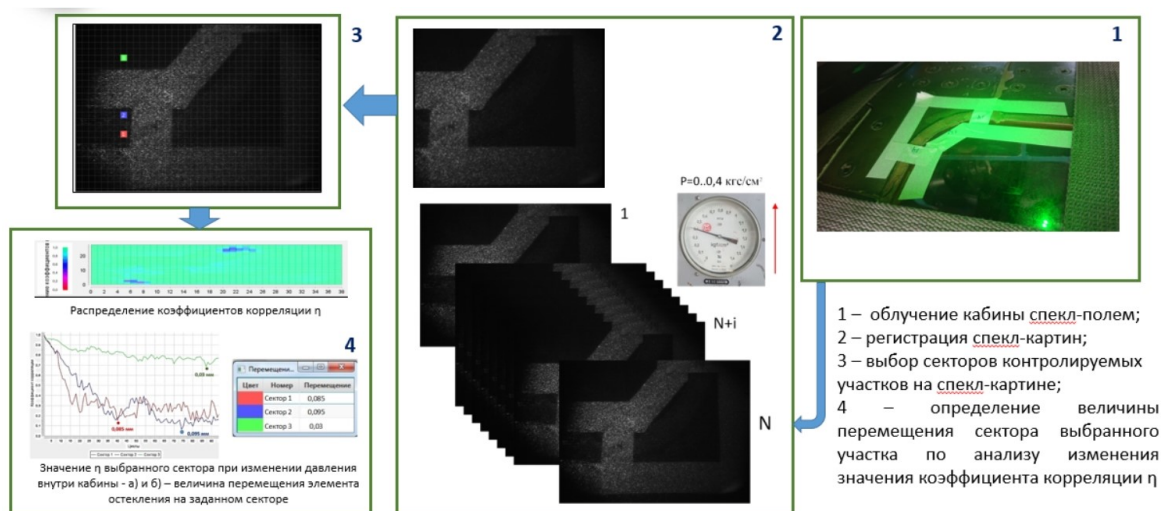


Рис. 5 – Порядок проведения испытаний АПК

Последующие испытания проходили при создании избыточного давления внутри кабины с шагом $0,1 \text{ кгс/см}^2$ от 0 до $0,4 \text{ кгс/см}^2$.

Предварительно по результатам предыдущих проверок выхода остекления из заделки устанавливались места на кабине, где были зафиксированы максимальные

значения перемещений остекления, поэтому данный участок подвергался зондированию спекл-полем.

Подготовка контролируемого участка заключалась в фиксации контрастных границ участка балка-герметик-стекло с помощью белой ПВХ ленты, Рис. 6.

В ходе эксперимента было записано 4 массива спекл-полей:

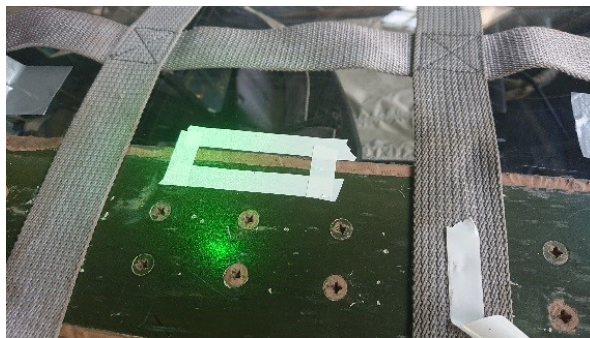
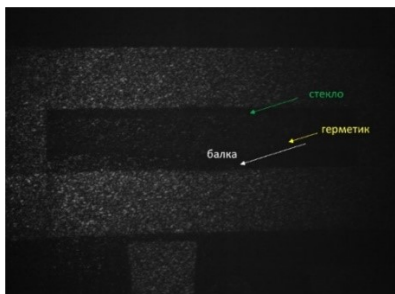
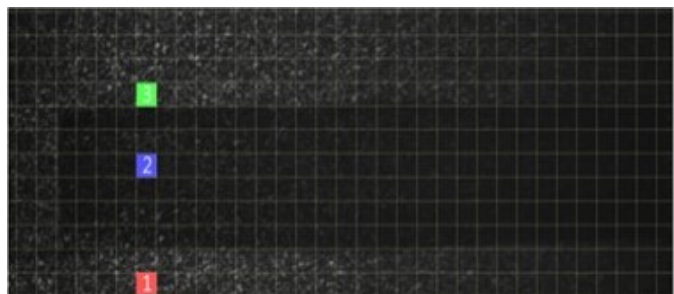


Рис. 6 – Подготовленный участок остекления на кабине самолета

- 1-ый массив – давление внутри кабины от 0 до 0,1 кгс/см²;
- 2-ой массив – давление внутри кабины от 0,1 до 0,2 кгс/см²;
- 3-ий массив – давление внутри кабины от 0,2 до 0,3 кгс/см²;
- 4-ый массив – давление внутри кабины от 0,3 до 0,4 кгс/см².



а)



б)

Рис. 7 – Зарегистрированное спекл-поле от подготовленного участка остекления

После регистрации спекл-поле разбивалось на сектора с одинаковыми размерами 10x10 пикселей (Рис. 7а). Далее оператором выбирались три сектора, соответствующие положению остекления, герметики и конструкции кабины (Рис. 7б). С учетом установленных оператором в программном модуле параметров оптической системы производился автоматический расчет перемещения выбранных секторов.

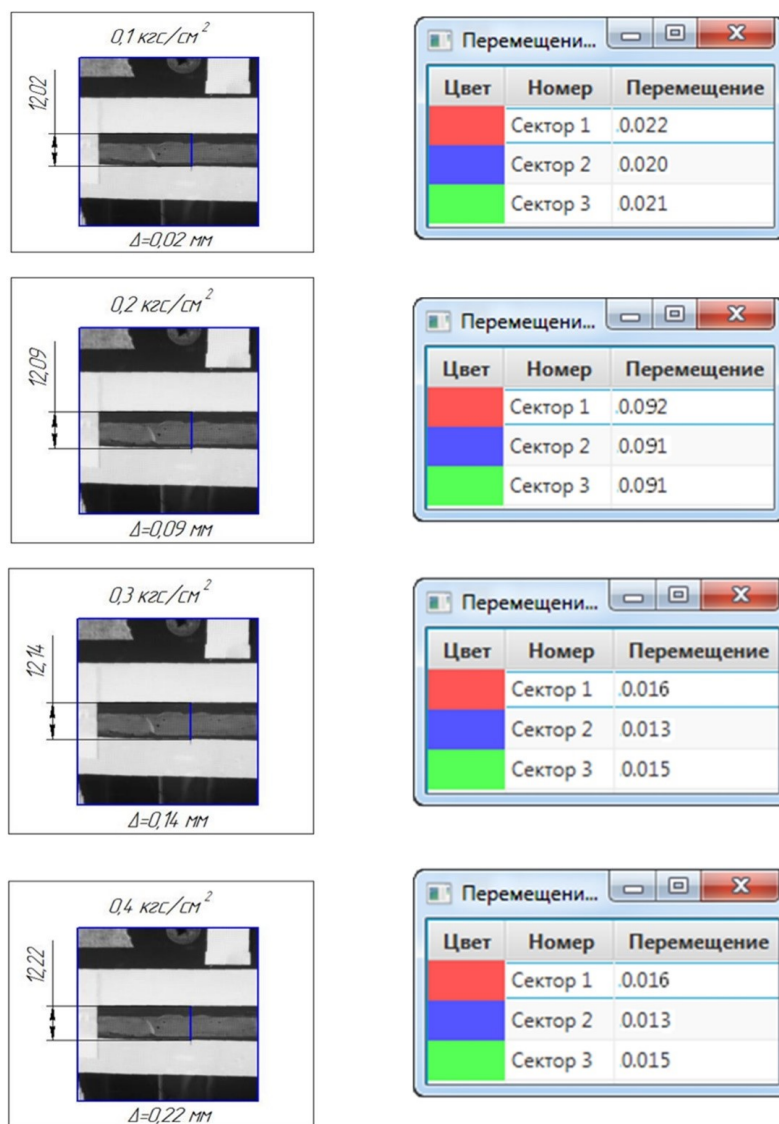


Рис. 8 – Результаты измерений величины перемещений элементов остекления кабины

самолета при изменении избыточного давления от 0 до 0,4 кгс/см² методом

видеофиксации левый ряд и с помощью АПК правый ряд

Расчет величины перемещения выбранных участков (секторов) производится автоматически с последующей выдачей оператору табличных значений величины перемещения участков остекления кабины самолета, как показано на Рис. 8.

Для адекватности полученных результатов проводилась верификация полученных измерений с методом цифровой видеофиксации. Полученные результаты подтвердили работоспособность разработанного способа и АПК для его реализации.

Заключение

В результате проделанной работы впервые предложен и реализован новый способ определения величины выхода остекления из заделки, повышающий качество подготовки воздушных судов инженерно-техническим составом к полетам. Впервые в качестве инструмента определения перемещений элементов остекления используется устройство принцип действия, которого основан на основе использования метода спекл-структур оптического излучения.

Применение разработанного АПК лазерной диагностики в ходе эксплуатации авиационной техники позволит существенно снизить экономические затраты, значительно уменьшить число допускаемых ошибок при определении величины выхода остекления из заделки, получать более точные значения измерений и формировать соответствующие выводы о состоянии клеевого соединения внутри заделки остекления.

В ходе испытаний установлено, что комплекс позволяет оперативно (в реальном масштабе времени) осуществлять оценку технического состояния элементов остекления; постобработку, сравнение и документирование результатов испытаний; создавать базу данных испытаний; обеспечивать оператора всеми необходимыми данными для принятия решений о техническом состоянии элементов остекления кабины воздушного судна.

Список источников

1. Крылов А.А., Комлев А.Б., Попов А.Б., Волошина В.Ю. Способ диагностирования заделки остекления фонаря кабины воздушного судна. Патент RU 2722400. МПК В64F 5/00. Бюл. №16, 28.06.2018.
2. Лебедев А.С., Добролюбов А.Н., Михайленко А.В., Безруков А.В. Применение системы распознавания образов при оптико-электронном контроле поверхностей элементов изделий // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=116578>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-018](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-018)
3. Лебедев А.С., Добролюбов А.Н., Безруков А.В., Ярыгин Д.М. Повышение информативности системы распознавания загрязнений элементов ракетно-космической техники // Труды МАИ. 2021. № 118 URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158257>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-18](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-18)
4. Павлов П.В., Вольф И.Э., Евсин А.О., Владимиров А.П., Степанов А.Р., Хакимов Л.Н. Способ определения дефекта в заделке остекления кабины. Патент RU 2759038. МПК В64F 5/00. Бюл. №31. 19.11.2021

5. Павлов П.В., Горюнов А.Е. Аппаратно-программный комплекс неразрушающего контроля // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=57019>
6. Владимиров А.П., Друкаренко Н.А., Каманцев И.С., Павлов П.В., Евсин А.О. Спекл-диагностика элементов остекления кабин воздушных судов из органического стекла // Авиационная промышленность. 2021. № 3-4. С. 97–103.
7. Горюнов А.Е., Павлов П.В., Петров Н.В. Неразрушающий контроль композитных материалов по анализу параметров цифровой спекл-фотографии // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2014. № 64. С. 132–135.
8. Владимиров А.П. К спекл-томографии функций живой клетки // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2020. Т. 63. № 8. С. 658–671.
9. Сердобинцев Ю.П., Кухтик М.П. Изучение контактной жесткости в моделях направляющих станков методом спекл-фотографии // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 4. С. 87–93. DOI: [10.17513/snt.38620](https://doi.org/10.17513/snt.38620)
10. Усов С.М., Разумовский И.А., Одинцев И.Н. Исследование полей остаточных напряжений с использованием трещин-индикаторов и метода электронной спекл-интерферометрии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 9. С. 50–58. DOI: [10.26896/1028-6861-2021-87-9-50-58](https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-9-50-58)
11. Ивченко А.В., Сафин А.И. Совершенствование процесса регистрации колебаний рабочих колёс ГТД при помощи помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра панорамного типа // Динамика и виброакустика. 2022. Т. 8. № 3. С. 20–30.

12. Лобанов Л.М., Пивторак В.А. Диагностика конструкций методами электронной ширографии и спекл-интерферометрии // Сварка и диагностика. 2014. № 2. С. 27–32.
13. Владимиров А.П., Каманцев И.С., Друкаренко Н.А., Тришин В.Н., Акашев Л.А., Дружинин А.В. Оценка усталостных повреждений в органическом стекле оптическими методами // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. № 5. С. 870–880.
DOI: [10.21883/OS.2019.11.48530.165-19](https://doi.org/10.21883/OS.2019.11.48530.165-19)
14. Савченко Е.А., Величко Е.Н. Применение спекл-корреляционного анализа для определения скорости кровотока // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 7. С. 991–997. DOI: [10.21883/OS.2020.07.49572.86-20](https://doi.org/10.21883/OS.2020.07.49572.86-20)
15. Исмаилов Д.А. Измерение перемещений методом цифровой спекл-интерферометрии // Научный журнал Физика. 2015. № 1. С. 122–125.
16. Максимова Л.А., Рябухо П.В., Мысина Н.Ю., Лякин Д.В., Рябухо В.П. Цифровая спекл-фотография субпиксельных смещений спекл-структур на основе анализа их пространственных спектров // Журнал технической физики. 2018. Т. 124. № 4. С. 518–527.
DOI: [10.21883/OS.2018.04.45754.230-17](https://doi.org/10.21883/OS.2018.04.45754.230-17)
17. Петров Н.В., Беспалов В.Г., Жевлаков А.П., Солдатов Ю.И. Определение скорости движения объекта в воде с использованием метода цифровой спек-фотографии // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 11. С. 70–73.
18. Vladimirov A.P. Speckle metrology of dynamic macro- and microprocesses in deformable media // Optical Engineering, 2016, vol. 55 (12), pp. 1217–1227.
DOI: [10.1117/1.OE.55.12.121727](https://doi.org/10.1117/1.OE.55.12.121727)

19. Vladimirov A.P. Dynamic speckle interferometry of high-cycle material fatigue: Theory and some experiments // AIP Conference Proceedings, 2016, vol. 1740, pp. 040004. DOI: 10-1063/14962663

20. Павлов П.В., Лагошный И.С., Вольф И.Э., Степанов А.Р., Евсин А.О., Оношко А.М. Программный модуль динамической спекл-интерферометрии. Свидетельство РФ о регистрации программы для ЭВМ №2021669662, 01.12.21.

References

1. Krylov A.A., Komlev A.B., Popov A.B., Voloshina V.Yu. *Patent RU 2722400. MPK B64F 5/00*, 28.06.2018

2. Lebedev A.S., Dobrolyubov A.N., Mikhailenko A.V., Bezrukov A.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116578>. DOI: 10.34759/trd-2020-112-018

3. Lebedev A.S., Dobrolyubov A.N., Bezrukov A.V., Yarygin D.M. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158257>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-18

4. Pavlov P.V., Vol'f I.E., Evsin A.O., Vladimirov A.P., Stepanov A.R., Hakimov L.N. *Patent RU 2759038. MPK B64F 5/00*, 19.11.2021.

5. Pavlov P.V., Goryunov A.E. *Trudy MAI*, 2015, no. 80. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57019>

6. Vladimirov A.P., Drukarenko N.A., Kamantsev I.S., Pavlov P.V., Evsin A.O. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2021, no. 3-4, pp. 97–103.

7. Goryunov A.E., Pavlov P.V., Petrov N.V. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2014, no. 64, pp. 132–135.
8. Vladimirov A.P. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika*, 2020, vol. 63, no. 8, pp. 658–671.
9. Serdobintsev Yu.P., Kukhtik M.P. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2021, no. 4, pp. 87–93. DOI: 10.17513/snt.38620
10. Usov S.M., Razumovskii I.A., Odintsev I.N. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2021, vol. 87, no. 9. pp. 50–58. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-9-50-58
11. Ivchenko A.V., Safin A.I. *Dinamika i vibroakustika*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 20–30.
12. Lobanov L.M., Pivtorak V.A. *Svarka i diagnostika*, 2014, no. 2, pp. 27–32.
13. Vladimirov A.P., Kamantsev I.S., Drukarenko N.A., Trishin V.N., Akashev L.A., Druzhinin A.V. *Optika i spektroskopiya*, 2019, vol. 127, no. 5, pp. 870–880. DOI: 10.21883/OS.2019.11.48530.165-19
14. Savchenko E.A., Velichko E.N. *Optika i spektroskopiya*, 2020, vol. 128, no. 7, pp. 991–997. DOI: 10.21883/OS.2020.07.49572.86-20
15. Ismailov D.A. *Nauchnyj zhurnal Fizika*. 2015. vol 1. pp. 122–125.
16. Maksimova L.A., Ryabukho P.V., Mysina N.Yu., Lyakin D.V., Ryabukho V.P. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2018, vol. 124, no. 4, pp. 518–527. DOI:10.21883/OS.2018.04.45754.230-17
17. Petrov N.V., Bepalov V.G., Zhevlakov A.P., Soldatov Yu.I. *Opticheskii zhurnal*, 2007, vol. 74, no. 11, pp. 70–73.

18. Vladimirov A.P. Speckle metrology of dynamic macro- and microprocesses in deformable media, *Optical Engineering*, 2016, vol. 55 (12), pp. 1217–1227.
DOI:10.1117/1.OE.55.12.121727
19. Vladimirov A.P. Dynamic speckle interferometry of high-cycle material fatigue: Theory and some experiments, *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1740, pp. 040004.
DOI: 10-1063/14962663
20. Pavlov P.V., Lagoshnyi I.S., Vol'f I.E., Stepanov A.R., Evsin A.O., Onoshko A.M.
Svidetel'stvo RF o registratsii programmy dlya EVM №2021669662, 01.12.21.

Статья поступила в редакцию 02.03.2023

Одобрена после рецензирования 15.03.2023

Принята к публикации 27.04.2023

The article was submitted on 02.03.2023; approved after reviewing on 15.03.2023;
accepted for publication on 27.04.2023