

ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛНОВОГО АЛГОРИТМА

Д. В. Скляревский*, А. А. Хвостов**, С. Г. Тихомиров*, А. А. Никитченко**

*Воронежский государственный университет инженерных технологий,

**ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

Поступила в редакцию 22.01.2016 г.

Аннотация. Описана методика анализа морфологии трещин на поверхности испытываемых на климатическое старение образцов резинотехнических изделий (РТИ) с помощью волнового алгоритма. Показан способ расчёта длины, ширины раскрытия трещин. Предложены формализованные морфологические признаки для описания степени ветвистости трещин и их искривления. Приводится описание алгоритма перехода от растрового скелета трещины к его сегментному представлению.

Ключевые слова: морфологический признак, трещина, волновой алгоритм, скелет изображения, ветвление, граф, резина.

Annotation. It describes a method for the analysis of cracks on the surface of the test samples on the climatic aging rubber products using the wave algorithm. It shows a method of calculating of the crack length, the width of the cracks. Proposed formalized morphological characteristics to describe the degree of branching cracks and curvature are considered. The description of the algorithm of transformation from raster skeletal crack to its segmental description.

Keywords: morphological features, crack, wave algorithm, skeleton images, branching, graph, rubber.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для описания и классификации параметров, характеризующих различного рода дефекты на фотоизображениях поверхностей из различных материалов существует несколько основных подходов. В области анализа формы и классификации графических объектов большое распространение получили методы анализа скелета изображения: методы непрерывной бинарной морфологии [1, 2], волновой алгоритм [3–5], алгоритм дистанционных карт [5], алгоритм топологического утоньшения [5, 6] и др. Для определения ширины раскрытия трещин в железобетонных покрытиях разработан метод [7]. Для классификации трещин также применяются нейронные сети [8].

Для контроля технического состояния резинотехнических изделий (РТИ) существенное значение имеет развитие методов видеометрического анализа степени разрушения и старения резины в агрессивной климатической среде (экстремальная температура, воздействие кислорода и озона, и др.). Степень и характер разрушения резины могут быть оценены с использованием анализа фотоснимков изделия [9, 10]. Основным фактором, определяющим степень разрушения резинового изделия, является степень покрытия его трещинами, которая характеризуется количеством, длиной, шириной трещин, их геометрической формой и рядом других параметров.

При разработке новых типов РТИ проводят ряд испытаний образца на устойчивость к воздействиям различных агрессивных сред. Для моделирования воздействия агрессивных сред используются климатические камеры. Однако, обработка данных о степени

© Скляревский Д. В., Хвостов А. А., Тихомиров С. Г., Никитченко А. А., 2016

повреждения образца, производимая в процессе исследований может представлять существенные трудности.

Предварительная обработка серии снимков процесса разрушения образца РТИ с целью улучшения качества анализируемых изображений и сегментации обнаруженных повреждений рассмотрена в работах [9, 10].

Для наиболее полного формализованного описания процесса разрушения с точки зрения наблюдаемых визуальных признаков необходимо получить геометрическое и морфологическое описание повреждений (трещин) на поверхности образца РТИ.

Для морфологического описания свойств трещины необходимо разработать алгоритм, позволяющий извлечь из растрового изображения трещин РТИ максимально возможное количество параметров.

Из существующих алгоритмов обработки изображений для описания свойств трещин был выбран волновой алгоритм (алгоритм распространения сферической волны). Различные варианты реализации данного алгоритма наиболее часто применяются для скелетизации растровых изображений (в частности – при распознавании текстовых символов) и поиска оптимального пути (в компьютерных играх и при трассировке печатных плат) [3–5].

СВОЙСТВА ВОЛНОВОГО АЛГОРИТМА

Распространение волны по поверхности произвольной фигуры на изображении может быть 4-хнаправленным и 8-минаправленным (рис. 1 а-б)

Для формирования сферической волны необходимо реализовать попеременное 4-х и 8-минаправленное распространение. Такое комбинирование позволяет сформировать волну, оптимально подстраивающуюся под форму произвольной фигуры (рис. 1(в)) [3].

Исходя из приведённых утверждений, запишем множество волновых кластеров K :

$$K = \left(k_{i,j}^w = k_{n+u,m+v}^{w-1} \left[\left[|u| = |v| \right] (w = 2 \cdot z, z \in Z) \right] \right);$$

$$w = \overline{2, Nw_{\max}}; \quad u = \overline{-1, 1}; \quad v = \overline{-1, 1};$$

$$i, m = \overline{1, M}; \quad j, n = \overline{1, N}, \quad (1)$$

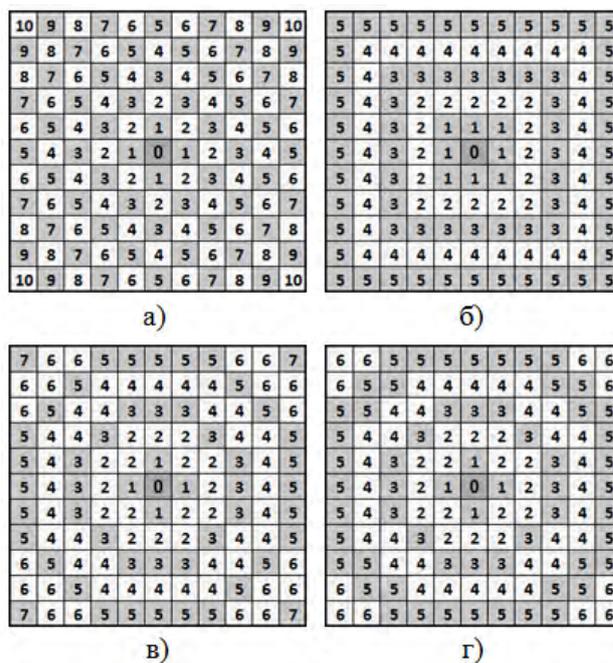


Рис.1. Виды распространения волн на плоскости: а) 4-хнаправленное распространение; б) 8-минаправленное распространение; в) Попеременное 4-х и 8-минаправленное распространение; г) Попеременное 4-х и 8-минаправленное распространение с переходом на 8-минаправленное распространение в окрестностях границ объекта

где K – множество волновых кластеров; $k_{i,j}^w$ – элемент волны с индексом w и координатами i и j и максимальным значением Nw_{\max} ; m, n – координаты элемента предыдущей волны; u, v – окрестность координат элемента предыдущей волны; M, N – максимальное количество элементов (пикселей) графического объекта по вертикали и горизонтали; Z – множество целых чисел.

Множество имеет ограничение, которое заключается в разрешении использовать 8-минаправленное распространение только в случае, когда номер волны из множества Z имеет чётное значение.

Однако, в ряде случаев, когда на этапе перехода от 8-минаправленного к 4-хнаправленному распространению, область доступных для заполнения точек переходит в диагональную линию, алгоритм может завершиться раньше, чем необходимо. Для устранения этого недостатка алгоритм был модифицирован: на каждом этапе 4-хнаправленного распро-

странения волны проверяется, присутствуют ли в окрестности 3×3 текущей заполняемой точки граничные пиксели. При обнаружении критического числа таких участков производится принудительный переход к этапу 8-ми-направленного заполнения (рис.1 (г)).

С учётом вышеизложенного, заполнение доступной области контура с использованием модифицированного волнового алгоритма можно записать в следующем виде:

$$K = \left(k_{i,j}^w = k_{n+u,m+v}^{w-1} \left[|u| = |v| \left(w = 2 \cdot z, z \in Z \right) \vee \left[\left(k_{n+u,m+v}^{w-1} = 0 \right) \wedge \left(k_{i,j}^w \neq k_{n+u,m+v}^{w-1} \right) \right] \right] \right); \quad (2)$$

$$w = \overline{2, Nw_{\max}}; \quad u = \overline{-1, 1}; \quad v = \overline{-1, 1};$$

$$i, m = \overline{1, M}; \quad j, n = \overline{1, N}.$$

В результате модификации алгоритма получена форма волны, чувствительная к перегибам контура и устойчивая при распространении на диагональных линиях. На рис. 2 показан пример заполнения сверху-вниз контура трещины РТИ адаптированным волновым алгоритмом. Направление изменения градиента яркости показывает переход от одной волны к другой. Стрелками показано направление распространения волны.

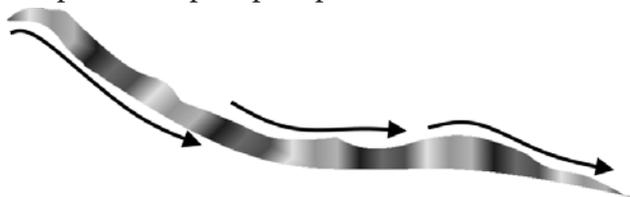


Рис. 2. Покрытие изображения трещины волнами с применением модифицированного волнового алгоритма (градиентное представление)

Применение данного подхода позволяет решить сразу несколько задач морфологического описания трещин в образцах РТИ:

- определить по заданному масштабу длину трещины;
- определить среднюю ширину раскрытия трещины;
- определить максимальную ширину раскрытия трещины;
- определить количество ответвлений трещины.

ПРИМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ВОЛНОВОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНЫ

Воспользовавшись предварительно заданным масштабом – количеством пикселей в метрической единице pt , можно с высокой степенью точности рассчитать длину трещины, среднюю и максимальную ширину раскрытия трещины.

Длина наибольшего сегмента трещины L_{\max} определяется по формуле:

$$L_{\max} = \frac{Nw_{\max}}{pt}. \quad (3)$$

Пусть d_{nw}^{\max} – максимальное расстояние между элементами волнового кластера K^{nw} :

$$d_{nw}^{\max} = \max \left(K_1^{nw}, K_2^{nw}, \dots, K_i^{nw}, \dots, K_N^{nw} \right), \quad (4)$$

где $nw \equiv \overline{1, Nw_{\max}}$ – индекс волнового кластера; $i = \overline{1, N}$ – индекс элемента текущей волны; N – максимальное количество элементов волны.

Тогда максимальную наблюдаемую ширину раскрытия трещины W_{\max} без ответвлений можно вычислить по следующей формуле:

$$W_{\max} = \frac{\max \left(d_1^{\max}, d_2^{\max}, \dots, d_{nw}^{\max}, \dots, d_{Nw_{\max}}^{\max} \right)}{pt}, \quad (5)$$

Средняя ширина наблюдаемого раскрытия трещины определяется как:

$$W_{cp} = \frac{\sum_{nw=1}^{Nw_{\max}} d_{nw}^{\max}}{Nw_{\max} \cdot pt}. \quad (6)$$

В более сложном случае, волна расходится по ответвлениям (рис. 3), образуя новые волновые кластеры с одинаковыми индексами (рис. 4а).

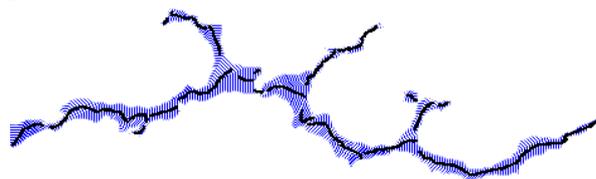


Рис. 3. Пример покрытия волнами трещины РТИ с ответвлениями. Линиями по центру показан скелет изображения

Для решения задачи сегментации ветвистых трещин в процессе прохождения волны, выполним индексацию кластеров смежных

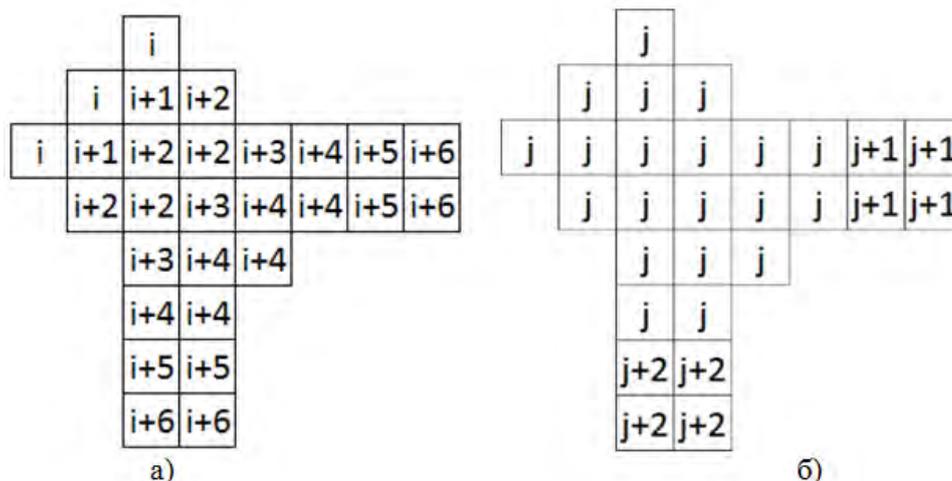


Рис.4. Участок контура с разветвлением:
 а) Пространство индексов волн; б) Пространство индексов разветвлений

точек каждого ответвления при обнаружении отсутствия смежности хотя бы двух точек волны (рис. 4б).

Таким образом, смежное с множеством волновых кластеров K множество ответвлений Br трещины в растровом представлении запишется как:

$$Br = \{b_j\}, \quad j = \overline{1, Nb}, \quad (7)$$

где b_j – растровое представление ответвления трещины с индексом j ; Nb – количество ответвлений трещины.

Исходя из этого, целесообразно для получения других морфологических характеристик использовать значение полной длины трещины $L_{полн}$, которая численно равна значению суммы количества всех прошедших волн, через все ветви трещины:

$$L_{полн} = \frac{\sum_{j=1}^{Nb} Nw_j^{ветв}}{pm}, \quad (8)$$

где $Nw_j^{ветв}$ – количество волн, прошедших через j -е ответвление.

Учитывая, что на участках разветвления значение ширины волны может быть больше, чем фактическое из-за особенностей работы алгоритма, то при расчёте максимальной ширины раскрытия разветвленной трещины перед участками разветвления целесообразно использовать поправочный коэффициент $\eta_\omega < 1$, зависящий от количества точек на дюйм изображения (dpi) и текущего расстояния до точки разветвления ω . Скорректиро-

ванное максимальное расстояние между элементами nw волны запишется как:

$$dk_{nw}^{макс} = d_{nw}^{макс} \cdot \eta_\omega. \quad (9)$$

Эмпирически установлено, что при 96 dpi расстояние, при котором необходимо ввести коэффициент η_ω лежит в диапазоне 10–20 пикселей. Чем меньше дистанция до точки разветвления, тем меньше η_ω . На данном примере (рис. 3) в точках разветвления $\eta_\omega \approx 0,5$.

Таким образом, формула (5) для j -го ответвления, разветвляющегося далее примет вид:

$$W_j^{макс} = \frac{\max(dk_{j,1}^{макс}, dk_{j,2}^{макс}, \dots, dk_{j,nw}^{макс}, \dots, dk_{j,Nw_{макс}}^{макс})}{pm}, \quad (10)$$

где j – индекс ответвления b .

Введём дополнительный морфологический признак – показатель разветвленности трещины:

$$Db = \frac{\sum_{j=1}^{Nb} L_{b_j}}{L_{макс}} - 1, \quad (11)$$

где L_{b_j} – длина j -го ответвления трещины.

Этот признак позволяет численно выразить степень разветвлённости трещины. Чем больше значение показателя отличается от нулевого, тем больше по длине ответвления имеет трещина. При незначительном отклонении значения признака от нулевого, можно говорить о том, что трещина имеет лишь не-

значительные неровности. Примеры трещин с разным значением показателя представлены на рис. 5.

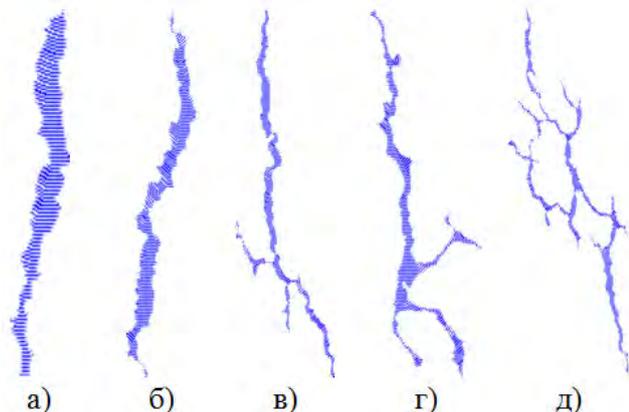


Рис.5. Примеры трещин РТИ с различным показателем разветвлённости: а) $Db = 0,002$; б) $Db = 0,009$; в) $Db = 0,323$; г) $Db = 0,372$; д) $Db = 0,873$

Данный показатель может применяться для однозначной классификации трещин по степени разветвленности без использования дополнительных усложненных математических расчетов.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТРЕЩИНЫ В ВИДЕ СТРУКТУРНОГО ГРАФА

Для выделения и подсчёта ответвлений трещин необходимо воспользоваться выполненной ранее индексацией ответвлений (7) и скелетом растрового изображения. Множество точек скелета графического объекта Sk (рис. 3), полученного с помощью волнового алгоритма записывается как:

$$Sk = \left(sk_{nw,j} \mid sk_{nw,j} \subset Br \right), \quad (12)$$

$$nw = \overline{1, Nw}, j = \overline{1, Nb}.$$

Элемент скелета контура $sk_{nw,j}$ может быть получен по формуле:

$$sk_{nw,j} = \frac{\sum_{i=1}^N k_i^{[nw,j]}}{N}, k_i^{[nw,j]} \subset Br, \quad (13)$$

где i – индекс элемента волны; N – максимальное количество элементов волны с индексом nw и номером ответвления j .

Для того, чтобы преобразовать растровый скелет Sk множества сегментов B ветвящей-

ся трещины в структурные элементы, был разработан алгоритм запаздывающего скользящего отрезка фиксированной длины.

Алгоритм использует критерий минимальной разницы угла φ_s между крайними точками скользящего по дискретному скелету отрезка (рис. 6) AB и угла φ_b между первой точкой следующего ответвления скелета и конечной точкой скользящего отрезка, отставляя на фиксированное количество пикселей ξ до точки разветвления:

$$S = \begin{cases} B \cup C, & \text{если } |\varphi_s - \varphi_{b1}| < |\varphi_s - \varphi_{b2}|, \\ B \cup D & \end{cases} \quad (14)$$

где S – формируемый элемент множества структурных сегментов трещины.

Пример работы алгоритма представлен на рис. 6.

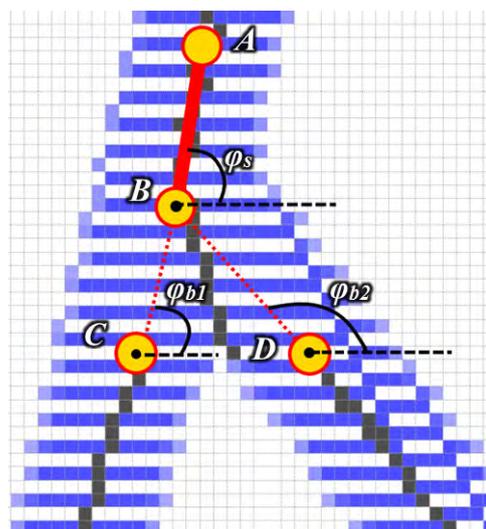


Рис. 6. Пример работы алгоритма запаздывающего скользящего отрезка

Очевидно, что в данном примере произойдёт слияние точек BC , т. к. разница между углами φ_s и φ_{b1} удовлетворяет условию (14).

Как правило, для преобразования растрового скелета объекта в граф используют представление, где вершинами графа являются узловые точки, а ребрами сами сегменты объекта [4]. Полученный структурный индексированный скелет сегментов трещины S позволяет перейти к альтернативному представлению в виде ориентированного по направлению волны структурного связного графа:

$$Sg = (S, E), \quad (15)$$

где S – множество структурных сегментов трещины; E – множество связей сегментов (отношения предок-потомок).

Каждая вершина графа представляет собой множество параметров сегмента трещины:

$$S = \{Id_{род}, Id, W_{макс}, W_{ср}, L_{абс}, L_{полн}, C, \delta_{макс}, \bar{P}\}, \quad (16)$$

где Id – идентификатор сегмента; $Id_{род}$ – идентификатор связанного родительского сегмента; $W_{макс}$ – максимальная ширина раскрытия сегмента трещины; $W_{ср}$ – средняя ширина раскрытия сегмента трещины; $L_{абс}$ – абсолютная длина сегмента (расстояние от краевых точек сегмента); $L_{полн}$ – полная длина сегмента в Евклидовой метрике; C – показатель искривления сегмента трещины; $\delta_{макс}$ – максимальное отклонение кривой скелета сегмента от осевой линии между краевыми точками сегмента; \bar{P} – вектор, включающий координаты начальной и конечной точки сегмента $p_1(x_1, y_1)$ и $p_2(x_2, y_2)$ соответственно.

Показатель C , характеризует отклонение формы сегмента трещины от прямой линии (искривление):

$$C = \frac{L_{абс}}{L_{полн}} - 1, \quad (17)$$

Подобный показатель описан в работе [2].

Результат сегментации трещины покажем на примере, содержащем 7 вершин и 6 рёбер соответственно. Каждый сегмент трещины (вершина графа) представлен прямой линией, ограниченной начальной и конечной точками вектора \bar{P} сегмента (рис. 7).

Полученное дерево графа примера на рис. 7 имеет вид (рис. 8).

Описанное представление позволяет определить количество сегментов (ответвлений) трещины, отобразить связь между сегментами трещины и свойства каждого сегмента.

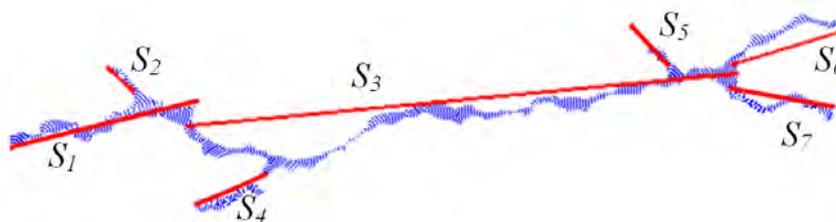


Рис. 7. Распознанные сегменты разветвлённой трещины

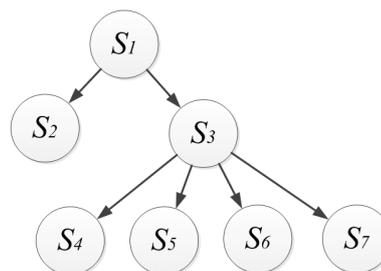


Рис. 8. Представление трещины в виде дерева связанного ориентированного графа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате была получена модификация волнового алгоритма, позволяющая формализовать набор признаков, характеризующих процесс развития трещины во времени. Рассмотренные показатели в дальнейшем могут быть использованы для автоматизации процессов классификации трещин, как в отдельности, так и в их совокупности на анализируемом участке РТИ. Разработанные методы также могут быть использованы для детального изучения структуры трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Местецкий Л. М. Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры / Л. М. Местецкий. – М. : Физматлит, 2009. – 288 с.
2. Кушнир О. А. Сравнение формы бинарных растровых изображений на основе скелетизации / О. А. Кушнир // Машинное обучение и анализ данных. – 2012. – Т. 1, № 3. – С. 252–263.
3. Клубков И. М. Применение волнового алгоритма для нахождения скелета растрового изображения / И. М. Клубков // Вестник Донского государственного технического университета. – 2001. – Т. 1, № 1(7). – С. 126–133.

4. *Каташевцев М. Д.* Волновая скелетизация / М. Д. Каташевцев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 7(78). – С. 89–93.

5. *Болтенков В. А.* Анализ алгоритмов скелетизации бинарных изображений / В. А. Болтенков, Нгуен Гуи Кионг, Д. В. Малявин // Электротехнические и компьютерные системы. – 2015. – № 17 (93). – С. 102–109.

6. *Zhang W.* Automatic Crack Detection and Classification Method for Subway Tunnel Safety Monitoring / W. Zhang, Z. Zhang, D. Qi, Y. Liu // Sensors. – 2014. – No.14. – P. 19308–19328. doi:10.3390/s141019307.

7. *Степанов В. Б.* Методика определения ширины раскрытия коррозионных трещин для оценки технического состояния железобетонных конструкций / В. Б. Степанов // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 5.– С. 6–11.

8. *Li L.* Automatic pavement crack recognition based on BP neural network / L. Li, L. Sun, G. Ning, S. Tan // Promet – Traffic & Transportation. – 2014. – Vol. 26, No. 1. – P.11–22.

9. *Хвостов А. А.* Методика оценки степени разрушения резинотехнических изделий с использованием алгоритмов машинного зрения / А. А. Хвостов, Д. В. Скляревский, А. А. Никитченко // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. –2015.– № 2. – С. 72–76.

10. *Хвостов А. А.* Применение алгоритмов машинного зрения для выявления сетки волосяных трещин на поверхности резинотехнических изделий / А. А. Хвостов, С. Г. Тихомиров, Д. И. Ребриков, Д. В. Скляревский // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 3(61). – С. 93–96.

Скляревский Д. В. – аспирант кафедры информационных и управляющих систем, факультет управления и информатики в технологических системах, Воронежский государственный университет инженерных технологий.

E-mail: dante2359@yandex.ru

Хвостов А. А. – д.т.н., профессор 206 кафедры математики, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина».

E-mail: khvtol1974@yandex.ru

Тихомиров С. Г. – д.т.н., профессор кафедры информационных и управляющих систем, факультет управления и информатики в технологических системах, Воронежский государственный университет инженерных технологий. E-mail: tikhomirov_57@mail.ru

Никитченко А. А. – к.т.н., преподаватель кафедры изыскания и проектирования аэродромов, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина».

E-mail: nik.to77@mail.ru

Sklyarevskiy D. V. – Graduate, Department of Information and Control Systems, Control and Informatics in Technological Systems Faculty, Voronezh State University of Engineering Technologies.

E-mail: dante2359@yandex.ru

Khvostov A. A. – Doctor of Technical Sciences, Professor, 206 Department of Mathematics, MERC “Zhukovsky – Gagarin Air Force Academy”.

E-mail: khvtol1974@yandex.ru

Tikhomirov S. G. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Information and Control Systems, Control and Informatics in Technological Systems Faculty, Voronezh State University of Engineering Technologies.

E-mail: tikhomirov_57@mail.ru

Nikitchenko A. A. – Ph. D., Teacher, Department of Researches and Designing Airfields, MERC “Zhukovsky – Gagarin Air Force Academy”.

E-mail: nik.to77@mail.ru