

© Сергей Владимирович Ершов<sup>1✉</sup>, Иван Александрович Суворов<sup>2</sup>,  
Сергей Олегович Кожевников<sup>3</sup>, Виктор Борисович Кузнецов<sup>4</sup>,  
Евгений Николаевич Калинин<sup>5</sup>, 2021

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Ивановский государственный политехнический университет,  
Иваново, Российская Федерация,

<sup>1</sup>ershovsv.iv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2587-5084>

<sup>2</sup>suvorov@live.it, <https://orcid.org/0000-0002-1824-0737>

<sup>3</sup>kojevnikov\_so@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2222-6759>

<sup>4</sup>kuznetsovtx@gmail.com

<sup>5</sup>enkalini@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6253-2227>

© Sergey V. Ershov<sup>1✉</sup>, Ivan A. Suvorov<sup>2</sup>, Sergey O. Kozhevnikov<sup>3</sup>,  
Viktor B. Kuznetsov<sup>4</sup>, Evgeny N. Kalinin<sup>5</sup>, 2021

Ivanovo State Polytechnic University,

Ivanovo, Russian Federation

<sup>1</sup>ershovsv.iv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2587-5084>

<sup>2</sup>suvorov@live.it, <https://orcid.org/0000-0002-1824-0737>

<sup>3</sup>kojevnikov\_so@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2222-6759>

<sup>4</sup>kuznetsovtx@gmail.com

<sup>5</sup>enkalini@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6253-2227>

### **Метод бинаризации как основа структурного анализа поверхностной плотности нетканого наполнителя композитного материала**

**Аннотация.** В статье сформулирован алгоритмический подход метода бинаризации и показана эффективность его реализации применительно к аналитическому исследованию поверхностной плотности нетканой структуры, используемой в качестве армирующей основы композитного материала, по цифровому образу ее поверхности. Данный метод является основой для определения влияния внешних факторов на параметры верификации модельного выхода показателей средней плотности структуры нетканого материала и прогнозирования конструкционных свойств полученного на его основе композитного материала.

**Ключевые слова:** бинаризация, плотность распределения волокон, поверхностная плотность матрицы, полимерный композит, цифровое изображение поверхности образца нетканого материала.

**Благодарность.** Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-43-370007 «Развитие научных основ прогнозирования функциональных и конструкционных параметров синтезируемых полимерных волокнистых композитных систем»).

### **Binarization method as a basis for structural study on the surface density of the nonwoven filler of a composite material**

**Absrtact.** The article formulates an algorithmic approach to the binarization method and shows the effectiveness of its implementation in relation to the analytical study on the surface density of a

nonwoven structure, used as a reinforcing base of a composite material according to the digital image of its surface. This method is considered to be the basis for determining the influence of external factors on the verification parameters of the model output of the average density indicators in the structure of the nonwoven material and predicting the structural properties of the composite material obtained on its basis.

**Keywords:** binarization, fiber distribution density, matrix surface density, polymer composite, digital image of the surface of a nonwoven material sample.

**Acknowledgements.** The work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 20-43-370007 “Development of scientific foundations for prediction of functional and structural parameters of synthesized polymer fibrous composite systems”).

### Введение

Нетканые структуры, как и другие полимерные волокнистые материалы различных структур, широко применяются в качестве армирующего компонента при производстве полимерных композитных материалов (далее – ПКМ). При этом в случае использования нетканого материала наиболее значимыми структурными параметрами, влияющими на физико-механические свойства ПКМ, являются поверхностная плотность нетканого армирующего компонента и равномерность ее распределения в полотне. Именно по этой причине качественный анализ данных параметров и их точное численное определение в процессе производства как самих нетканых структур, так и ПКМ на их основе представляют собой актуальную задачу<sup>1</sup>.

Развитие функциональных возможностей метода бинаризации для решения прикладных задач на основе разработанного нами алгоритмического программного комплекса<sup>2</sup> при анализе и синтезе состава нетканой структуры ПКМ по цифровому образцу поверхности плоского образца армирующей нетканой структуры является целью настоящей работы.

Численные результаты анализа цифровых образов и задачи по установлению плотности распределения волокон в плоском образце нетканой структуры заключаются в верификации модельного выхода геометрических параметров распределения волокон, организующих структуру образца – основы ПКМ.

---

<sup>1</sup> Composite Nonwoven Materials: Structure, Properties and Applications / edited by D. Das, B. Pourdeyhimi. – Cambridge, UK; Waltham, MA: Woodhead Publishing, 2014. – 252 p.

<sup>2</sup> Ершов С. В., Калинин Е. Н. Разработка программного комплекса для анализа направленности волокон в углеродных нетканых структурах // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 1 (62). – С. 12–16; Ершов С. В., Суворов И. А., Калинин Е. Н. Анализ плотности распределения волокон в нетканых плоских структурах по изображениям их поверхности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 2 (374). – С. 194–200; Суворов И. А., Ершов С. В. Определение поверхностной плотности нетканых плоских структур методом анализа изображений // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2018. – № 1–2. – С. 19–23.

Метод бинаризации активно применяется для анализа цифрового образа волокнистой структуры<sup>1</sup>, однако процесс его реализации, как правило, сопровождается погрешностями и искажениями в виде разрывов в линиях, потерями значащих деталей изображения, появлением шумовых сигналов различной спектральной плотности и непредсказуемыми отклонениями параметров структуры по причине неоднородности фона<sup>2</sup>, что в значительной мере влияет на точность результатов анализа.

### **Основная часть**

Для повышения точности результатов анализа, получаемых при реализации традиционных процедур бинаризации при работе с цифровыми образами поверхности армирующей нетканой волокнистой структуры, препрега и изделия из ПКМ, нами сформулирован алгоритмический комплекс мероприятий, обеспечивающий преобразования цифрового образа плоской нетканой структуры<sup>3</sup>.

На рис. 1 а, б представлен результат трансформации цифрового образа, полученного с использованием компьютеризированной оптической системы и нетканой плоской армирующей структуры ПКМ, синтезированной средствами разработанного нами программного вычислительного блока<sup>4</sup>, способного обеспечить поэтапную инверсию в форме полутоновых изображений в виде «черный – серый – белый».

Цифровые образы в 3D-сфере, трансформированные в спектральных частотах, соответствующих преобразованиям яркости, гамма-коррекции с заданной цветовой детализацией объекта-цифрового образа волокнистой структуры (см. рис. 1 в), демонстрируют достигнутый результат компенсации потерь резкости изображения во-

---

<sup>1</sup> Drobina R., Machnio M. S. Application of the Image Analysis Technique for Textile Identification // AUTECH Research Journal. – 2006. – Vol. 6. – № 1. – P. 40–48; Грузинцева Н. А, Грушина Ю. С., Павлов С. В., Гусев Б. Н. Совершенствование методики компьютерного исследования поверхности теплоизоляционных строительных материалов // Приволжский научный журнал. – 2017. – № 2 (42). – С. 98–105.

<sup>2</sup> Gonzales R. C., Richard R. E. Digital Image Processing. – New Jersey: Pearson Education international, 2012. – 1104 p.

<sup>3</sup> Ершов С. В., Суворов И. А., Калинин Е. Н. Анализ плотности распределения волокон в нетканых плоских структурах по изображениям их поверхности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 2 (374). – С. 194–200.

<sup>4</sup> Ершов С. В., Калинин Е. Н. Разработка программного комплекса для анализа направленности волокон в углеродных нетканых структурах // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 1 (62). – С. 12–16; Ершов С. В., Суворов И. А., Калинин Е. Н. Анализ плотности распределения волокон в нетканых плоских структурах по изображениям их поверхности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 2 (374). – С. 194–200; Суворов И. А., Ершов С. В. Определение поверхностной плотности нетканых плоских структур методом анализа изображений // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2018. – № 1–2. – С. 19–23; Ершов С. В., Калинин Е. Н., Тидт Т. Анализ направленности углеродных волокон в реальных нетканых структурах технического назначения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 6 (360). – С. 189–193.

локнистой структуры, создающей предпосылки к достижению требуемой точности результата вычислительного эксперимента.

Бинарная пороговая сегментация, обеспечивающая идентификацию геометрических параметров пространственной ориентации линий волокон (см. рис. 1 г) в нетканой структуре в соответствии с методом Оцу (Otsu's method)<sup>1</sup>, является основой для решения задачи структурного анализа и синтеза при прогнозировании поверхностной плотности нетканой матрицы армирующего компонента ПКМ.

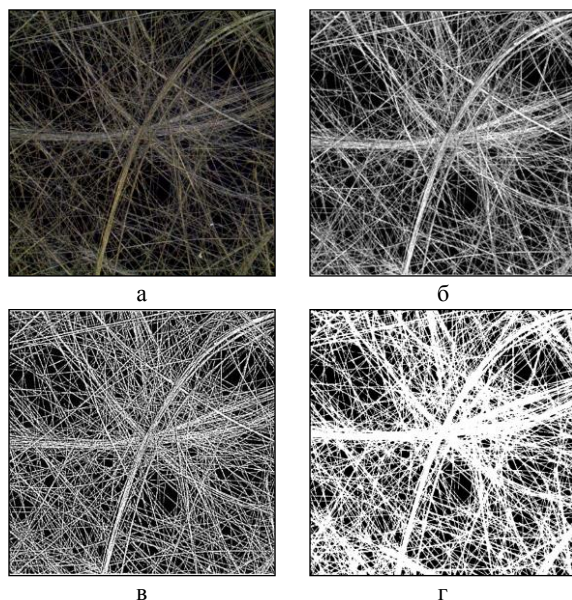


Рис. 1. Процедура бинаризации цифрового изображения нетканой структуры:  
а – изображение нетканой структуры, полученное непосредственно с оптического прибора;  
б – преобразование в полутоновое изображение;  
в – коррекция изображения в пространственной области;  
г – бинарная пороговая сегментация изображения по методу Оцу

Бинарная трансформация цифрового образа армирующей волокнистой нетканой структуры ПКМ с позиций его численного анализа представляет собой матрицу чисел, определяющих состояние геометрических линий волокон (см. рис. 1 г). Численное разрешение цифрового образа обуславливается размером матрицы изображения, а выделенные линии волокон устанавливают занимаемую ими часть в общей площади плоской поверхности и являются параметром для анализа ее поверхностной плотности<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Gonzales R. C., Richard R. E. Digital Image Processing. – New Jersey: Pearson Education international, 2012. – 1104 p.

<sup>2</sup> Ершов С. В., Суворов И. А., Калинин Е. Н. Анализ плотности распределения волокон в нетканых плоских структурах по изображениям их поверхности // Известия высших учебных

Для плоских волокнистых структур сравнение по величине суммарной площади, занимаемой волокнами в образце, должно быть воспринято как адекватное значению результата модельного выхода при определении удельного показателя суммарной величине площади волокнистого образца и занимаемой в нем волокнами поверхности при различии массовых показателей  $m$  волокон, образующих нетканую структуру, при параметрической характеристике  $k_s$  в долях от общей площади  $S$  поверхности нетканого образца<sup>1</sup>.

При установлении неравномерности распределения волокон в образце должно быть выполнено деление образца на сегменты и рассчитано значение параметрической характеристики  $k_s$  для каждого из них (см. рис. 2), что обеспечивает заданную точность выходного результата при высокой скорости вычислительного процесса<sup>2</sup>.

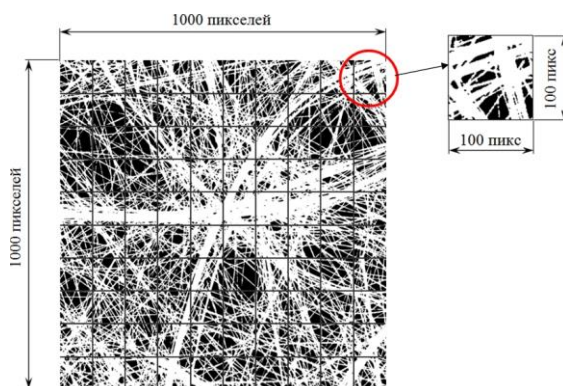


Рис. 2. Сегментация цифрового изображения нетканой структуры

Исследуемые образцы нетканых структур по результатам преобразований, полученных в ходе проведения процедур метода бинаризации, представлены на рис. 3 а1–а3. Цветовые карты на рис. 3 б1–б3 из сегментированного образа испытуемого образца, в зависимости от уровня показателей области значений поверхностной плотности нетканой структуры, обеспечивают визуализацию результатов анализа вычислительного эксперимента.

---

заведений. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 2 (374). – С. 194–200; Суворов И. А., Ершов С. В. Определение поверхностной плотности нетканых плоских структур методом анализа изображений // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2018. – № 1–2. – С. 19–23.

<sup>1</sup> Ершов С. В., Суворов И. А., Калинин Е. Н. Анализ плотности распределения волокон в нетканых плоских структурах по изображениям их поверхности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 2 (374). – С. 194–200.

<sup>2</sup> Ершов С. В., Калинин Е. Н. Влияние пиксельной характеристики цифровых изображений нетканых структур на точность результатов их компьютерного анализа // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 6 (366). – С. 243–248.

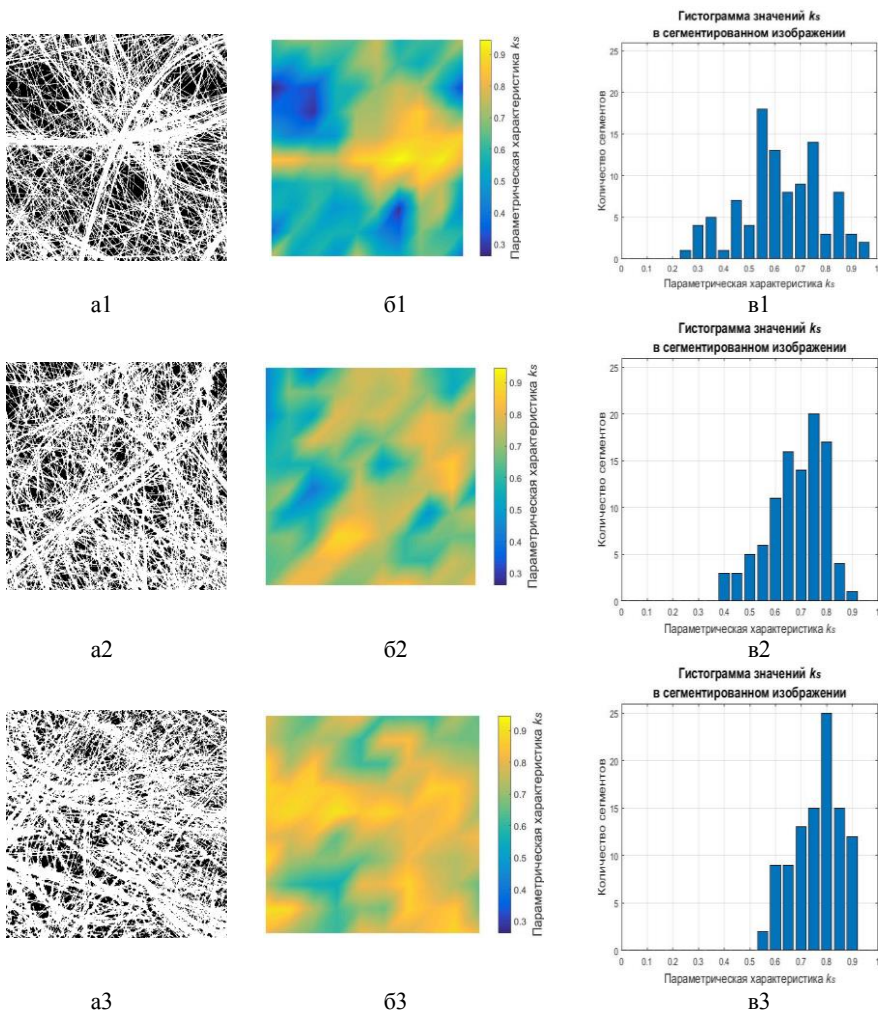


Рис. 3. Результаты анализа изображений исследуемых образцов нетканых структур:

- a1, a2, a3 – цифровые изображения образцов нетканых структур после применения процедур бинаризации;
- b1, b2, b3 – цветные карты поверхности нетканой структуры исследуемых образцов;
- v1, v2, v3 – гистограммы, характеризующие плотность распределения волокон в нетканой структуре

Кроме того, мы по сегментированным образам исследуемых образцов ПКМ определили и представили в виде гистограмм диапазон и частоту распределения значений параметрической характеристики  $k_s$  (см. рис. 3 v1–v3).

Исходя из данных гистограмм, изображенных на рис. 3 v1–v3, наблюдается тенденция к увеличению концентрации значений параметрической характеристики  $k_s$  в окрестности определенных значений при уменьшении их диапазона; данная тенденция позволила нам спрогнозировать неравномерность поверхностной плотности ис-

следуемых образцов нетканого материала в соответствии с законом нормального распределения<sup>1</sup>.

Благодаря развитию технологии реализации метода бинаризации и разработанного нами на его основе алгоритмического программного комплекса, сочетающего возможности системы MATLAB, по данным из гистограмм на рис. 3 в1–в3 получены графические зависимости нормального распределения параметрической характеристики  $k_s$  для исследуемых образцов волокнистого материала и значения  $\mu$  и  $\sigma$  для каждого из них (см. рис. 4). На базе данных значений реализуется метод бинаризации, являющийся основой структурного анализа поверхностной плотности нетканой матрицы композитного материала с определением средней плотности и неравномерности распределения волокон  $k_{ср}$  в исследуемых образцах плоской нетканой структуры как компонента армирующей структуры ПКМ<sup>2</sup>.

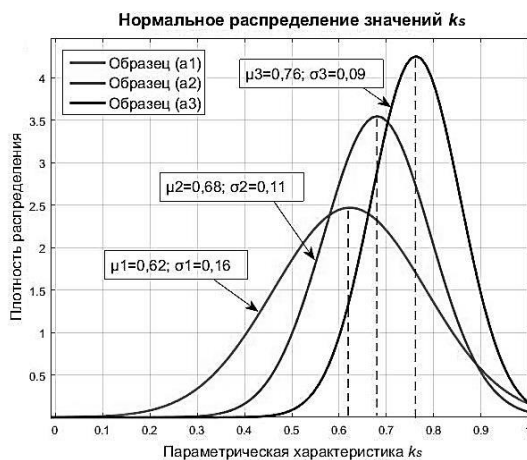


Рис. 4. Полученное распределение поверхностной плотности исследуемых образцов нетканой структуры

## Выводы

В ходе нашего исследования мы пришли к следующим выводам:

<sup>1</sup> Ершов С. В., Калинин Е. Н., Тидт Т. Анализ направленности углеродных волокон в реальных нетканых структурах технического назначения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 6 (360). – С. 189–193; Ершов С. В., Калинин Е. Н. Влияние пиксельной характеристики цифровых изображений нетканых структур на точность результатов их компьютерного анализа // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 6 (366). – С. 243–248.

<sup>2</sup> Ершов С. В., Суворов И. А., Калинин Е. Н. Анализ плотности распределения волокон в нетканых плоских структурах по изображениям их поверхности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 2 (374). – С. 194–200; Суворов И. А., Ершов С. В. Определение поверхностной плотности нетканых плоских структур методом анализа изображений // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2018. – № 1–2. – С. 19–23.

1. Результаты анализа вычислительного эксперимента дают возможность выполнять как визуальный контроль плотности распределения волокон в нетканой плоской структуре по цветовым картам их поверхности, так и получать численные значения результатов анализа, которые могут быть использованы для прогнозирования физико-механических свойств нетканых плоских структур.

2. При решении задач синтеза ПКМ на основе результатов анализа численного эксперимента, при условии установления требуемого значения плотности распределения волокон  $k_{\text{ср}}$  в нетканом материале и допустимого диапазона отклонения этих значений  $\pm\sigma$ , разработанный нами вычислительный комплекс в своем дальнейшем развитии может быть использован как программный блок для создания автоматизированной системы управления технологическим процессом формирования поверхностной плотности нетканой плоской структурной системы «волоконистая матрица – связующее» в масштабах производства ПКМ с заданными физико-механическими параметрами синтезируемого конструкционного материала.

3. Разработанные нами алгоритмы трансформации цифровых образов плоских нетканых структур с применением метода бинарной пороговой сегментации Оцу (Otsu's method), а также процедура построения цветовых карт поверхности нетканой плоской структуры по их цифровому образу с использованием закона нормального распределения дают возможность исключить погрешности традиционно практикуемых процедур метода бинаризации, требуемых для анализа параметров системы «армирующий компонент – связующее» ПКМ.

4. Достоверность результатов реализации разработанного нами алгоритмического обеспечения в рамках метода бинаризации цифрового образа нетканой плоской структуры и полнота полученных данных, характеризующих закономерность распределения волокон по поверхности плоской структуры образца нетканого материала, подтверждают эффективность использования указанного программного комплекса, реализующего принципы метода бинаризации как основы структурного анализа поверхностной плотности нетканого армирующего ПКМ.

### Список литературы

Грузинцева Н. А, Грушина Ю. С., Павлов С. В., Гусев Б. Н. Совершенствование методики компьютерного исследования поверхности теплоизоляционных строительных материалов // Приволжский научный журнал. – 2017. – № 2 (42). – С. 98–105.

Ершов С. В., Калинин Е. Н. Влияние пиксельной характеристики цифровых изображений нетканых структур на точность результатов их компьютерного анализа // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 6 (366). – С. 243–248.

Ершов С. В., Калинин Е. Н. Разработка программного комплекса для анализа направленности волокон в углеродных нетканых структурах // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 1 (62). – С. 12–16.

Ершов С. В., Калинин Е. Н., Тидт Т. Анализ направленности углеродных волокон в реальных нетканых структурах технического назначения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 6 (360). – С. 189–193.

Ершов С. В., Суворов И. А., Калинин Е. Н. Анализ плотности распределения волокон в не-

тканых плоских структурах по изображениям их поверхности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 2 (374). – С. 194–200.

Суворов И. А., Ершов С. В. Определение поверхностной плотности нетканых плоских структур методом анализа изображений // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2018. – № 1–2. – С. 19–23.

Composite Nonwoven Materials: Structure, Properties and Applications / edited by D. Das, B. Pourdeyhimi. – Cambridge, UK; Waltham, MA: Woodhead Publishing, 2014. – 252 p.

Drobina R., Machnio M. S. Application of the Image Analysis Technique for Textile Identification // Autex Research Journal. – 2006. – Vol. 6. – № 1. – P. 40–48.

Gonzales R. C., Richard R. E. Digital Image Processing. – New Jersey: Pearson Education international, 2012. – 1104 p.

### References

Gruzintseva N. A., Grushina Iu. S., Pavlov S. V., Gusev B. N. Sovershenstvovanie metodiki komp'uternogo issledovaniia poverkhnosti teploizoliatsionnykh stroitel'nykh materialov [Improving methods of computer studying of the surface of thermal insulation construction materials]. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal* [The Privolzhsky Scientific Journal], 2017, no. 2 (42), pp. 98–105.

Ershov S. V., Kalinin E. N. Vliianie piksel'noi kharakteristiki tsifrovyykh izobrazhenii netkanykh struktur na tochnost' rezul'tatov ikh komp'uternogo analiza [Influence of digital image pixel characteristics of nonwoven structures on the accuracy of their computer analysis results]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti* [The news of higher educational institutions. Technology of textile industry], 2016, no. 6 (366), pp. 243–248.

Ershov S. V., Kalinin E. N. Razrabotka programmnoogo kompleksa dlia analiza napravlenosti volokon v uglerodnnykh netkanykh strukturakh [Development of the software system for the analysis of fiber orientation in the carbon nonwoven structures]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepovets State University Bulletin], 2015, no. 1 (62), pp. 12–16.

Ershov S. V., Kalinin E. N., Tidt T. Analiz napravlenosti uglerodnnykh volokon v real'nykh netkanykh strukturakh tekhnicheskogo naznacheniia [Analysis of carbon fiber orientation in real nonwoven structures of technical purposes]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti* [News of higher educational institutions. Technology of textile industry], 2015, no. 6 (360), pp. 189–193.

Ershov S. V., Suvorov I. A., Kalinin E. N. Analiz plotnosti raspredeleniia volokon v netkanykh ploskikh strukturakh po izobrazheniiam ikh poverkhnosti [Analysis of fiber distribution density in planar nonwoven structures using their surface images]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti* [News of higher educational institutions. Technology of textile industry], 2018, no. 2 (374), pp. 194–200.

Suvorov I. A., Ershov S. V. Opredelenie poverkhnostnoi plotnosti netkanykh ploskikh struktur metodom analiza izobrazhenii [Determining surface density of nonwoven planar structures by applying image analysis]. *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoistva, naukoemkie tekhnologii i materialy: sbornik materialov XXI Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma "SMARTEX-2018", 26–28 sentyabrya 2018 goda* [Physics of fibrous materials: structure, properties, high technologies and materials: Proceedings of the XXI International research and practice forum "SMARTEX-2018", September 26–28, 2018]. Ivanovo: IVGPU, 2018, part 2, pp. 19–23.

Composite Nonwoven Materials: Structure, Properties and Applications; ed. by D. Das, B. Pourdeyhimi. Cambridge, UK; Waltham, MA: Woodhead Publishing, 2014. 252 p.

Drobina R., Machnio M. S. Application of the Image Analysis Technique for Textile Identification. *Autex Research Journal*, 2006, vol. 6, no. 1, pp. 40–48.

Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. New Jersey: Pearson Education, 2012. 1104 p.

**Для цитирования:** Ершов С. В., Суворов И. А., Кожевников С. О., Кузнецов В. Б., Калинин Е. Н. Метод бинаризации как основа структурного анализа поверхностной плотности нетканого наполнителя композитного материала // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2021. – № 1 (100). – С. 9–19. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-1>

**For citation:** Ershov S. V., Suvorov I. A., Kozhevnikov S. O., Kuznetsov V. B., Kalinin E. N. Binarization method as a basis for structural study on the surface density of the nonwoven filler of a composite material. *Cherepovets State University Bulletin*, 2021, no. 1 (100), pp. 9–19. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-1>

**Заявленный вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

#### Сведения об авторах

Сергей Владимирович Ершов /  
Sergey V. Ershov

Кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-2587-5084>, [ershovsv.iv@yan-dex.ru](mailto:ershovsv.iv@yan-dex.ru), Ивановский государственный политехнический университет (д. 21, Шереметевский пр-т, 153000 Иваново, Российская Федерация) / Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-2587-5084>, [ershovsv.iv@yandex.ru](mailto:ershovsv.iv@yandex.ru), Ivanovo State Polytechnic University (21, Sheremetevsky pr., 153000 Ivanovo, Russian Federation).

Иван Александрович Суворов /  
Ivan A. Suvorov

Аспирант, <https://orcid.org/0000-0002-1824-0737>, [suvorov@live.it](mailto:suvorov@live.it), Ивановский государственный политехнический университет (д. 21, Шереметевский пр-т, 153000 Иваново, Российская Федерация) / Postgraduate student, <https://orcid.org/0000-0002-1824-0737>, [suvorov@live.it](mailto:suvorov@live.it), Ivanovo State Polytechnic University (21, Sheremetevsky pr., 153000 Ivanovo, Russian Federation).

Сергей Олегович Кожевников /  
Sergey O. Kozhevnikov

Кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-2222-6759>, [kojevnikov\\_so@mail.ru](mailto:kojevnikov_so@mail.ru), Ивановский государственный политехнический университет (д. 21, Шереметевский пр-т, 153000 Иваново, Российская Федерация) / Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-2222-6759>, [kojevnikov\\_so@mail.ru](mailto:kojevnikov_so@mail.ru), Ivanovo State Polytechnic University (21, Sheremetevsky pr., 153000 Ivanovo, Russian Federation).

Виктор Борисович Кузнецов /  
Viktor B. Kuznetsov

Доктор технических наук, профессор, kuznetsov-tex@gmail.com, Ивановский государственный политехнический университет (д. 21, Шереметевский пр-т, 153000 Иваново, Российская Федерация) / Doctor of Technical Sciences, Professor, kuznetsovtex@gmail.com, Ivanovo State Polytechnic University (21, Sheremetevsky pr., 153000 Ivanovo, Russian Federation).

Евгений Николаевич Калинин /  
Evgeny N. Kalinin

Доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-6253-2227>, enkalini@gmail.com, Ивановский государственный политехнический университет (д. 21, Шереметевский пр-т, 153000 Иваново, Российская Федерация) / Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-6253-2227>, enkalini@gmail.com, Ivanovo State Polytechnic University (21, Sheremetevsky pr., 153000 Ivanovo, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию: 09.11.2020

Одобрена после рецензирования: 14.12.2020

Принята к публикации: 21.12.2020

The article was submitted: 09.11.2020

Approved after reviewing: 14.12.2020

Accepted for publication: 21.12.2020