

**АНАЛИЗ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛОКОН  
В НЕТКАНЫХ ПЛОСКИХ СТРУКТУРАХ  
ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ИХ ПОВЕРХНОСТИ\***

**ANALYSIS OF FIBER DISTRIBUTION DENSITY  
IN PLANAR NONWOVEN STRUCTURES  
USING THEIR SURFACE IMAGES**

*С.В. ЕРШОВ, И.А. СУВОРОВ, Е.Н. КАЛИНИН*  
*S.V. ERSHOV, I.A. SUVOROV, E.N. KALININ*

(Ивановский государственный политехнический университет)  
(Ivanovo State Polytechnical University)  
E-mail: ershovsv.iv@yandex.ru

*Авторами разработан программный комплекс, который позволяет анализировать плотность распределения волокон и определять ее неравномерность в нетканых плоских структурах по изображениям их поверхности. В составе программного комплекса разработаны алгоритм бинаризации цифровых изображений плоских нетканых структур, процедура построения цветных карт их поверхности и математическая модель плотности распределения волокон для определения ее неравномерности.*

*The authors developed a software system that allows analyzing fiber distribution density and determining its non-uniformity in planar nonwoven structures using their surface images. As a part of the software system a binarization algorithm for digital images of planar nonwoven structures, a procedure for constructing color maps of their surfaces and a mathematical model of the fibers distribution density to determine its non-uniformity were developed.*

**Ключевые слова:** плоские нетканые структуры, поверхностная плотность, метод бинаризации Оцу, сегментация изображения.

**Keywords:** planar nonwoven structures, surface density, Otsu binarization method, image segmentation.

Важной структурной характеристикой плоских нетканых полотен является плотность распределения волокон (поверхностная плотность), а ее точное измерение и контроль в процессе производства нетканого материала является актуальной задачей [1]. Анализ плотности распределения волокон позволяет оценить неравномерность нетканого материала и в комплексе с

другими структурными характеристиками спрогнозировать его физико-механические свойства.

Целью работы является разработка программного комплекса, который позволит анализировать плотность распределения волокон (поверхностную плотность) и определять ее неравномерность в нетканых

---

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации на выполнение проекта по теме «Разработка технической системы для измерения направленности волокон в текстильных структурах с использованием метода анализа изображений» по программе международного научно-образовательного сотрудничества «Михаил Ломоносов» (задание № 2.12732.2018/12.2).

плоских структурах по изображениям их поверхности.

Компьютерный анализ изображений применительно к оценке плотности распределения волокон заключается в идентификации геометрии волокон, образующих структуру нетканого материала. С этой целью нами использован метод бинаризации изображений [2], который позволяет перевести полноцветное изображение нетканой структуры в черно-белое, пиксели которого имеют только два значения – 0 и 1. В результате волокна, образующие структуру нетканого материала, представляются как светлые линии на темном фоне (или наоборот – в зависимости от типа волокон), что радикально уменьшает количество лишней информации, которую приходится анализировать. Известно, что метод бинаризации применяется для анализа изображений волокнистых структур [3], [4], однако процесс бинаризации всегда сопровождается появлением искажений, таких как разрывы в линиях, потеря значащих деталей, появление шума и непредсказуемое искажение структур из-за неоднородности фона [2], что может существенно снизить точность результатов анализа.

Разработанный нами алгоритм обработки цифровых изображений плоских нетканых структур позволяет исключить дефекты бинаризации и включает в себя ряд последовательных процедур (рис. 1).

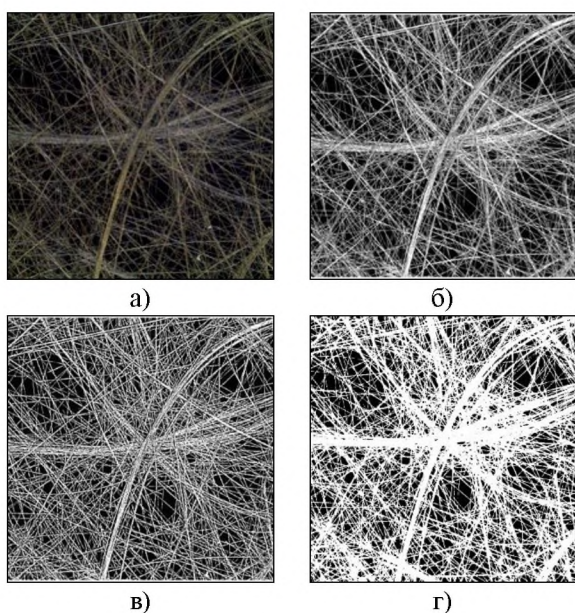


Рис. 1

На первом этапе изображения нетканых структур, полученные непосредственно с оптических приборов (рис. 1-а), предварительно обрабатываются с использованием разработанного нами ранее программного блока [5], [6]. Первоначально полноцветные изображения нетканой структуры конвертируются в полутоновые изображения, представляющие плавный переход от черного цвета через серый к белому (рис. 1-б). Затем примененные на этом этапе методы обработки изображений в пространственной области (преобразование яркости, гамма коррекция и т.д.) обеспечивают необходимую цветовую разделимость и компенсируют потери резкости изображений нетканых структур (рис. 1-в). Последующая обработка изображений заключается в применении метода бинаризации, а именно бинарной пороговой сегментации по методу Оцу [2], которая обеспечивает идентификацию линий волокон в нетканой структуре (рис. 1-г). Метод Оцу делит изображение нетканой структуры на составляющие его области и объекты, разделяя пиксели по определенному критерию однородности, что усиливает сигнал от интересующих нас объектов (линий волокон) и одновременно ослабляет влияние несущественных деталей изображения так, что дефекты, присутствующие традиционным алгоритмам бинаризации, исключаются.

Разработанный нами алгоритм обработки цифровых изображений плоских нетканых структур реализован в виде программного блока с использованием функций в системе MATLAB.

Переходя к анализу, бинарное изображение нетканой структуры рассматривается нами как матрица точек со значениями 0 и 1, где элементы матрицы со значением 1 (белые пиксели изображения) определяют линии волокон (рис. 1-г). Разрешение изображения – количество пикселей по горизонтали и вертикали ( $w \times h$ ) – задает размер матрицы. Выделенные таким образом линии волокон в изображении позволяют определить занимаемую ими площадь в об-

разце и оценить плотность их распределения (поверхностную плотность). В соответствии с [4] поверхностная плотность нетканых плоских структур  $\Pi_s$ , г/м<sup>2</sup>, определяется по формуле:

$$\Pi_s = m / S, \quad (1)$$

где  $m$  – масса образца, г;  $S$  – площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>.

Принимая площадь  $S$  поверхности исследуемых образцов одинаковой и постоянной, различие в плотности распределения волокон (поверхностной плотности) для образцов будет определяться различием масс  $m$  волокон, образующих нетканую структуру. В свою очередь для плоских нетканых структур сравнение образцов по массе может быть заменено сравнением по площади, которую занимают волокна в образцах.

Площадь, занимаемая волокнами, определяется нами параметрической характеристикой  $k_s$  в долях от общей площади поверхности образца  $S$  нетканого материала. Величина  $k_s$  рассчитывается из матрицы изображения нетканой структуры как отношение числа элементов со значением 1 (белые пиксели) к общему числу элементов матрицы (общее число точек изображения) по формуле:

$$k_s = \frac{\sum \text{white\_px}}{wh}. \quad (2)$$

Для нахождения неравномерности распределения волокон в образце нами выполняется разделение изображения на сегменты и рассчитывается параметрическая характеристика  $k_s$  для каждого из них (рис. 2). Число сегментов зависит от размера (разрешения) изображения и реальной площади нетканой структуры, которая передается этим изображением, и может быть различным. В настоящей работе нами выбрано разрешение изображения 1000×1000 пикселей, которое разработанный нами программный комплекс разбивает на 100 сегментов размером 100×100 пикселей. В соответствии с [7] такой размер изображения является достаточным для получения

точных результатов, обеспечивая при этом высокую скорость расчетов.

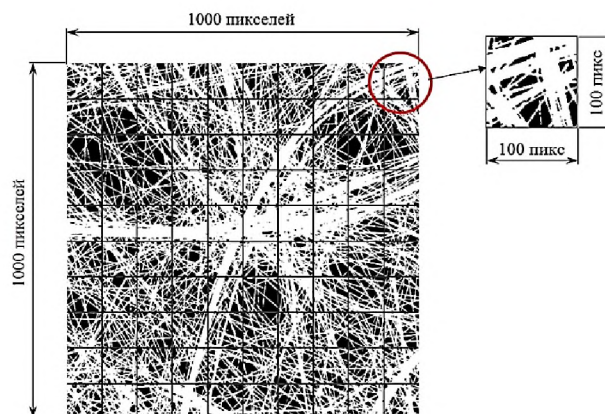


Рис. 2

Исследование плотности распределения волокон с использованием разработанного нами программного комплекса было проведено для трех образцов плоского нетканого материала, изготовленного в Институте текстильной техники Технического университета, г. Ахен (RWTH Aachen, Германия), из штапельного углеродного волокна аэродинамическим методом холстоформования. Изображения, полученные для разных участков поверхности нетканого полотна с различной поверхностной плотностью, были выбраны для анализа, загружены в разработанный нами программный комплекс и обработаны в соответствии с приведенным выше алгоритмом.

На рис. 3 (a1...a3) представлены полученные изображения исследуемых образцов нетканой структуры после примененных процедур бинаризации. На рис. 3 (б1...б3) приведены цветные карты поверхности нетканой структуры, построенные нами по сегментированным изображениям для каждого из образцов. Цветные карты поверхности позволяют определить расположение областей нетканой структуры с высокой и низкой поверхностной плотностью и облегчают визуальный контроль результатов анализа. Также по сегментированным изображениям исследуемых образцов нетканой структуры в виде гистограмм нами определены диапазон и частота распределения значений параметрической характеристики  $k_s$  (рис. 3

(в1...в3)). Для построения гистограмм значения параметрической характеристики  $k_s$  округлялись с точностью до 0,05.

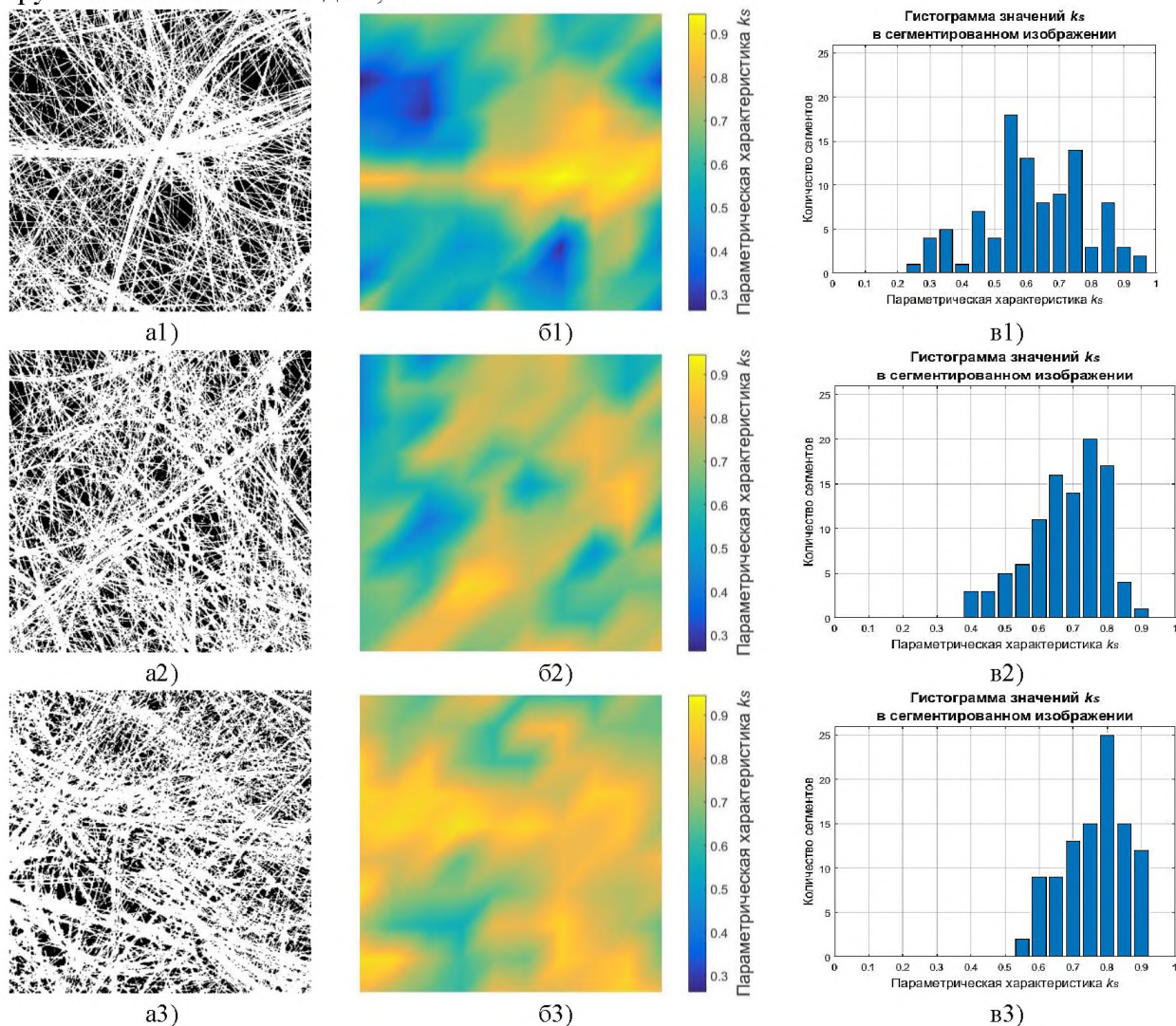


Рис. 3

Из гистограммы (в1) на рис. 3 видно, что образец плоской нетканой структуры (a1) имеет самый широкий диапазон значений параметрической характеристики  $k_s$  среди выбранных образцов. Распределение значений  $k_s$  по сегментам изображения нетканой структуры (a1) лежит в диапазоне (0,25...0,95), при этом 18 сегментов (наибольшее количество) имеют значение  $k_s=0,55$ . Для образцов (a2) и (a3) (рис. 3) диапазон значений параметрической характеристики  $k_s$  сокращается до (0,4...0,9) и (0,55...0,9) соответственно. При этом пиковое количество сегментов изображений с равными значениями  $k_s$  увеличивается. Для

изображения (a2) 20 сегментов имеют значение  $k_s=0,75$ , а для изображения (a3) 25 сегментов имеют значение  $k_s=0,8$ . Наблюдаемая из гистограмм (рис. 3 (в1-в3)) тенденция увеличения концентрации значений параметрической характеристики  $k_s$  около определенных величин при уменьшении диапазона этих значений позволила нам математически смоделировать неравномерность поверхностной плотности исследуемых образцов нетканого материала законом нормального распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – математическое ожидание, то есть среднее значение параметрической характеристики  $k_s$ , определяющей плотность распределения волокон в исследуемом образце ( $k_{s\_CP}$ ), а  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение значений  $k_s$ , определяющее форму кривой распределения.

Используя встроенные инструменты MATLAB, по данным, полученным из гистограмм (рис. 3 (в1...в3)), нами были смоделированы графики нормального распределения параметрической характеристики  $k_s$  для исследуемых образцов и определены значения  $\mu$  и  $\sigma$  для каждого из них (рис. 4).

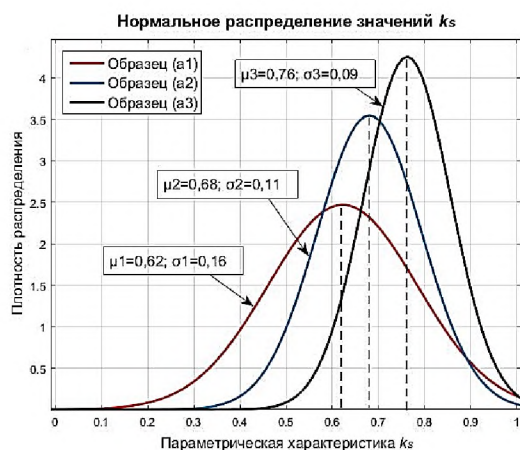


Рис. 4

Полученные значения  $\mu$  и  $\sigma$  позволяют по «правилу трех сигм» ( $\mu \pm 3\sigma$ ) определить интервал возможных значений параметрической характеристики  $k_s$  для каждого анализируемого образца нетканой плоской структуры, а также в форме  $\mu \pm \sigma$  указать интервал с наибольшей плотностью распределения значений  $k_s$ . Это означает, что чем меньше значение среднее квадратическое

отклонения  $\sigma$ , тем более равномерно распределены волокна в образце.

Анализ графиков (рис. 4) позволил определить среднюю плотность распределения волокон  $k_{s\_CP}$  в исследуемых образцах плоской нетканой структуры и ее неравномерность. Так, образец (a3) имел самую высокую среднюю плотность распределения волокон  $k_{s\_CP3}=0,76$ , обладая при этом наиболее равномерной структурой  $k_{s3}=0,76 \pm 0,09$ . Образец (a2) имел среднюю плотность распределения волокон  $k_{s\_CP2}=0,68$ , также обладая достаточно равномерной структурой  $k_{s2}=0,68 \pm 0,11$ . Самую низкую среднюю плотность распределения волокон  $k_{s\_CP1}=0,62$  с наибольшей неравномерностью  $k_{s1}=0,62 \pm 0,16$  среди исследуемых образцов имел образец (a1). Наблюдаемое увеличение неравномерности распределения волокон в исследуемых образцах с уменьшением средней плотности их распределения  $k_{s\_CP}$  объясняется аэродинамическим методом холстоформирования, который был использован для производства материала. Так как распределение волокон в нетканой структуре при таком способе производства носит случайный характер, низкая поверхностная плотность снижает вероятность их равномерного распределения. Визуальная оценка изображений нетканых структур (рис. 3(a1...a3)) и цветowych карт их поверхности (рис. 3(b1...b3)) соответствует полученным результатам.

Численные значения результатов анализа исследуемых образцов плоских нетканых структур с использованием разработанного нами программного комплекса представлены в табл. 1.

Таблица 1

Изображение нетканой структуры	Диапазон значений $k_s$ в сегментированном изображении	Значение $k_s$ в наибольшем числе сегментов	Среднее значение $k_s$ в образце, $k_{s\_CP}$	Среднее кв. отклонение значений $k_s$ в образце, $\sigma$	Интервал с наибольшей плотностью распределения значений $k_s$
Рис. 3(a1)	(0,25...0,95)	0,55	0,62	0,16	$0,62 \pm 0,16$
Рис. 3(a2)	(0,40...0,90)	0,75	0,68	0,11	$0,68 \pm 0,11$
Рис. 3(a3)	(0,55...0,90)	0,80	0,76	0,09	$0,76 \pm 0,09$

Таким образом, достоверность результатов проведенного нами анализа изобра-

жений нетканых плоских структур и полнота полученных данных, характеризующих распределение волокон, позволяют

сделать вывод об эффективности использования разработанного нами программного комплекса для оценки плотности распределения волокон в плоских нетканых материалах. Результаты анализа дают возможность выполнять как визуальный контроль плотности распределения волокон в нетканых плоских структурах по цветовым картам их поверхности, так и получать численные значения результатов анализа, которые могут быть использованы для прогнозирования физико-механических свойств нетканых плоских структур. В перспективе, задавая требуемое значение плотности распределения волокон  $k_s$  в материале и допустимый диапазон отклонения этих значений  $\pm\sigma$ , разработанный программный комплекс может быть использован для создания автоматизированной системы контроля поверхностной плотности нетканых плоских структур в масштабе действующего производства.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан программный комплекс, который позволяет анализировать плотность распределения волокон (поверхностную плотность) и определять ее неравномерность в нетканых плоских структурах по изображениям их поверхности.

2. Разработан алгоритм обработки цифровых изображений плоских нетканых структур с использованием метода бинарной пороговой сегментации Оцу, который позволяет исключить дефекты традиционных методов бинаризации, применяемых для анализа волокнистых структур.

3. Разработана процедура построения цветовых карт поверхности нетканых плоских структур по их изображениям и, используя закон нормального распределения, математически смоделирована неравномерность плотности распределения волокон в нетканом материале.

4. Выполнен анализ образцов нетканой плоской структуры из углеродных волокон с различной поверхностной плотностью, для которых через параметрическую харак-

теристику  $k_s$  определены средняя плотность распределения волокон и ее неравномерность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Das D., Pourdeyhimi B. Composite Nonwoven Materials: Structure, Properties and Applications // Woodhead Publishing. – 2014.

2. Gonzales R.C., Richard R.E. Digital Image Processing // Pearson Education. – 2012.

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

4. 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.

5. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Разработка программного комплекса для анализа направленности волокон в углеродных нетканых структурах // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015, №1. С. 12...17.

6. Ершов С.В., Калинин Е.Н., Тидт Т. Анализ направленности углеродных волокон в реальных нетканых структурах технического назначения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, №6. С. 189...193.

7. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Влияние пиксельной характеристики цифровых изображений нетканых структур на точность результатов их компьютерного анализа // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, №6. С. 243...247.

## REFERENCES

1. Das D., Pourdeyhimi B. Composite Nonwoven Materials: Structure, Properties and Applications // Woodhead Publishing. – 2014.

2. Gonzales R.C., Richard R.E. Digital Image Processing // Pearson Education. – 2012.

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

4. Gruzinceva N.A., Grushina Yu.S., Pavlov S.V., Gusev B.N. Sovershenstvovanie metodiki kompyuternogo issledovaniya poverhnosti teploizolyacionnyh stroitelnyh materialov // Privolzhskij nauchnyj zhurnal. – 2017, №2(42). S. 98...105.

5. Ershov S.V., Kalinin E.N. Razrabotka programmnogo kompleksa dlya analiza napravlenosti volokon v uglerodnyh netkanyh strukturah // Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta. – 2015, №1. S. 12...17.

6. Ershov S.V., Kalinin E.N., Tidt T. Analiz napravlenosti uglerodnih volokon v realnyh netkanyh strukturah tehničeskogo naznacheniya // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2015, №6. S.189...193.

7. Ershov S.V., Kalinin E.N. Vliyanie pikselnoj harakteristiki cifrovyyh izobrazhenij netkanyh struktur na tochnost rezultatov ih kompyuternogo analiza // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2016, №6. S. 243...247.

Рекомендована кафедрой наземных транспортных средств и технологических машин. Поступила 30.03.18.

---