

УДК 677.021

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_1\_91

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОДУКТА ПРЯДЕНИЯ**

**INVESTIGATION OF THE SPINNING PRODUCT CROSS-SECTION**

*П.Н. РУДОВСКИЙ<sup>1</sup>, И.С. БЕЛОВА<sup>1</sup>, Н.С. САХАРОВА<sup>2</sup>*

*P.N. RUDOVSKY<sup>1</sup>, I.S. BELOVA<sup>1</sup>, N.S. SAKHAROVA<sup>2</sup>*

*(<sup>1</sup>Костромской государственный университет,*

*<sup>2</sup>Московский авиационный институт Национальный исследовательский университет)*

*(<sup>1</sup>Kostroma State University,*

*<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute National Research University)*

*E-mail: pavel\_rudovsky@mail.ru, belova\_irina44@mail.ru, nina\_ves@mail.ru*

*Прочность продукта, получаемого в процессе прядения, во многом зависит от строения его поперечного сечения. В статье представлены методика и результаты экспериментов по исследованию поперечного сечения продукта прядения на примере льняной ровницы. Получено распределение волокон в поперечном сечении ровницы в радиальном и секторальном направлениях. Проведена проверка гипотезы о нормальном распределении волокон в сечении ровницы в радиальном направлении. Вычислены статистические характеристики полученного распределения. Полученные данные можно использовать при моделировании поперечного сечения продукта прядения с целью дальнейшего исследования и прогнозирования его прочностных свойств.*

*The strength of the product obtained in the spinning process largely depends on the structure of its cross-section. The article presents the methodology and results of experiments on the study of the spinning product cross-section on the example of a linen roving. The distribution of fibers in the cross-section of the roving in the radial and tangential directions is obtained. The hypothesis of fibers normal distribution in the section of the roving in the radial direction was tested. The statistical characteristics of the resulting distribution are calculated. The obtained data can be used in modeling the cross-section of the spinning product in order to further study and predict its strength properties.*

**Ключевые слова:** льняная ровница, поперечное сечение пряжи, распределение волокон, прочность пряжи.

**Keywords:** linen roving, yarn cross-section, fiber distribution, yarn strength.

## *Введение*

Одним из важных вопросов, возникающих при исследовании продукта прядения, является изучение его прочности. На прочность льняной некрученой ровницы влияет ряд таких факторов, как силы поверхностного натяжения водяных пленок [1], [2], наличие обвивочных волокон, а также наличие пектинов в составе льняного волокна. Показано, что поверхностное натяжение, возникающее вследствие наличия капиллярной влаги между волокнами в мокром продукте, исчезает при его высыхании [3]. Обвивочные волокна образуются на поверхности волокнистого продукта только при определенных соотношениях скорости движения волокнистого продукта и частоты вращения вьюрка [4...6]. В результате основным фактором, определяющим прочность волокнистого продукта, являются силы адгезии между волокнами. Как показано в [7], эти силы пропорциональны площади контакта между волокнами, которая в свою очередь определяется длиной участков скольжения соседних волокон и количеством этих участков. Количество контактов между волокнами в волокнистом продукте существенно зависит от распределения волокон по его поперечному сечению.

Для создания математической модели прочности некрученого продукта необходима модель такого распределения.

В первом приближении в качестве модели распределения волокон по сечению волокнистого продукта была предложена так называемая гексагональная модель. В этой модели сечения волокон представлялись окружностями равного диаметра, плотно заполняющими шестиугольник [1]. Данная модель представляет собой плотную паковку волокон, в которой каждое волокно касается шести соседних волокон.

На основе построенной модели были получены формулы для оценки прочности ровницы, экспериментальная проверка которых приведена в [2]. Очевидно, что такая модель далека от реальности. Полученные в результате расчетов по такой модели значения прочности ровницы превышают экспериментальные почти на порядок.

Более реальная модель предложена в [8]. В ней учтено, что волокна в сечении могут иметь разные размеры и распределены по сечению случайным образом. Закон распределения задается алгоритмом и не отражает реального закона распределения волокон по сечению. Адекватность полученной модели сечения текстильного продукта оценивается возможностью получения оценки для различных показателей, описывающих распределение волокон по сечению пряжи.

В действительности поперечное сечение прядильного продукта представляет собой множество объектов произвольной, иногда причудливой, формы – сечений волокон. Они заполняют некоторую область округлой формы без четко выраженных границ. Расположение волокон в поперечном сечении одиночной нити рассмотрено в [9]. В [10] проведены обширные исследования распределения волокон по поперечным сечениям пряжи кольцевого прядения. Установлено, что в центральной части данной области сечения волокон располагаются достаточно близко, касаясь друг друга. Чем дальше от центра области, тем дальше сечения волокон отстоят друг от друга. Исследования распределения волокон по сечениям бескруточного продукта – ровницы и пряжи не проводились. В случае рассмотрения бескруточной ровницы, полученной мокрым способом, наблюдается четко выраженная вытянутая форма поперечного сечения. Это связано с тем, что мычка, выходящая из выпускной пары формирующего механизма, приобретает форму ленточки [11]. Для повышения степени адекватности модели необходимо изучение формы сечений реальных продуктов прядения и распределения волокон в них.

## *Методы*

Проводились экспериментальные исследования поперечных сечений продукта прядения на примере льняной ровницы с целью установления законов распределения волокон в сечениях. Полученные данные можно будет использовать при моделировании поперечного сечения продукта прядения с учетом реального расположения волокон в сечении.

Для проведения эксперимента были выбраны образцы крученой и бескруточной льняной ровницы линейной плотности 550 текс. Отрезки ровницы длиной 20 мм заливались парафином для фиксирования их в неподвижном состоянии. После затвердевания подготовленных образцов с помощью санного микротома МС-2 было выполнено 10 поперечных срезов толщиной 10...30 мкм для каждого вида ровницы.

Далее с помощью цифрового микроскопа Levenhuk 870T с увеличением объектива 4× было получено по 10 цифровых изображений поперечных срезов крученой и бескруточной льняной ровницы. Типовые изображения полученных срезов представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

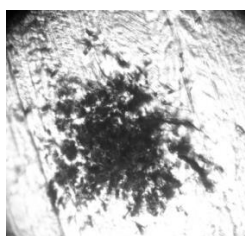


Рис. 1

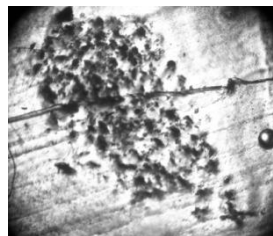


Рис. 2

Проведя анализ полученных изображений, можно заметить, что в центральной части среза наблюдается максимальное скопление волокон. При удалении от центра количество волокон уменьшается. Точно определить границы участков с различной неравномерностью по занимаемой площади сечениями волокон достаточно затруднительно. С целью более четкой визуализации данных границ цифровое изображение с помощью программы Adobe Photoshop было преобразовано в монохромное изображение. Полученные монохромные изображения поперечного сечения крученой и бескруточной ровницы представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

На монохромном изображении четко рассмотреть границы сечений волокон, входящих в состав ровницы, практически невозможно. Соприкасаясь друг с другом, сечения волокон сливаются в единое пятно произвольного размера и формы. С помощью компьютерной программы была проведена бинаризация полученных моно-

хромных изображений со средним пороговым значением 67. Таким образом, дальнейшие исследования было предложено проводить с учетом расположения черных и белых пикселей на изображении.

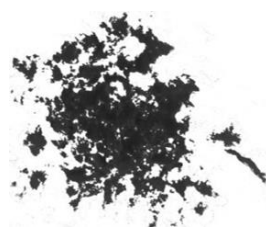


Рис. 3



Рис. 4

Обработка бинаризованных изображений проводилась с помощью специально созданной компьютерной программы. На первом этапе с помощью формул (1) были определены координаты  $(C_x, C_y)$  центра тяжести сечения ровницы:

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad C_y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (1)$$

где  $x_i, y_i$  – расстояния от черных пикселей до соответствующих координатных осей  $Ox$  и  $Oy$ ;  $n$  – общее количество черных пикселей.

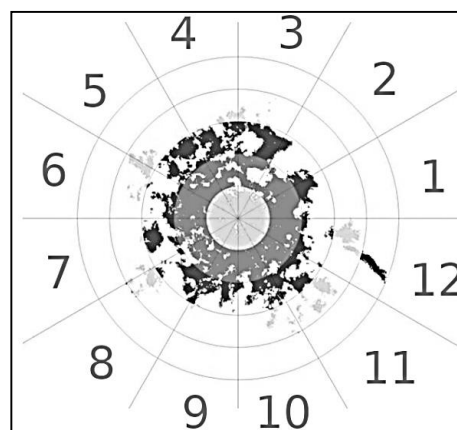


Рис. 5

На следующем этапе выполнялось построение 5 радиальных окружностей с центром в точке  $(C_x, C_y)$ . Окружностям были присвоены номера от 1 до 5, считая от центра. Для исследования полученного поперечного сечения продукта прядения в сек-

торальном направлении через центр тяжести сечения проводились прямые, разбивающие изображение на 12 равновеликих секторов. Секторы были пронумерованы, начиная с крайнего правого положения в направлении обхода против часовой стрелки. Пример результата разбиения поперечного среза крученой ровницы в радиальном и секторальном направлениях представлен на рис. 5.

Аналогичное разбиение проводилось для всех полученных изображений. Поскольку площадь пикселей одинакова, то количество пикселей в каждом секторе пропорционально количеству волокон в нем. Подсчет пикселей в каждом кольце и каждом секторе проводился с помощью программы.

#### *Результаты и обсуждения*

Анализ полученных изображений дал основания для выдвижения гипотезы о нормальном распределении сечений волокон в поперечном сечении ровницы.

С целью подтверждения или опровержения выдвинутой гипотезы были применены статистические методы [12]. Проверка гипотезы о нормальном распределении волокон в поперечном сечении ровницы в радиальном направлении проводилась с помощью критерия Пирсона.

Экспериментальные данные были представлены в виде интервального вариационного ряда. Для удобства проведения последующих вычислений было выделено 10 интервалов с шагом разбиения 1. Каждому интервалу ставилось в соответствие среднее значение части площади полукольца, заполненной черными пикселями.

Далее вычислялось наблюдаемое значение критерия Пирсона. Было получено значение  $\kappa_{\text{набл}} = 0,48$  для крученой ровницы и  $\kappa_{\text{набл}} = 0,43$  для бескруточной ровницы. Эти значения необходимо сравнить с критическим значением  $\kappa_{\text{кр}}$  правосторонней критической области.

По таблице критических точек распределения  $\chi^2$  Пирсона находим величину  $\kappa_{\text{кр}} = 14,07$ , с учетом уровня значимости  $\alpha = 0,05$  и количества степеней свободы 7.

Таким образом, исходя из выполнения условия  $\kappa_{\text{набл}} < \kappa_{\text{кр}}$ , можно говорить о подтверждении гипотезы о нормальном распределении сечений волокон в поперечном сечении льняной ровницы в радиальном направлении.

Для данного нормального распределения были получены следующие параметры распределения: для крученой ровницы среднее значение  $X_{\text{cp}} = 0,03$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 1,68$ , для бескруточной ровницы –  $X_{\text{cp}} = 0,01$ ,  $\sigma = 2,17$ . При уровне значимости  $\alpha = 0,95$  были построены доверительные интервалы для средних значений:  $(-1,06; 1,12)$  – для крученой ровницы,  $(-1,48; 1,50)$  – для бескруточной ровницы.

Рассмотрим секторальное разбиение полученных изображений поперечного сечения ровницы. Процентное значение площади, занимаемой черными пикселями в каждом из 12 секторов, приведено в табл. 1.

Таблица 1

Номер сектора		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
% занятой площади	Крученая ровница	12,1	15,6	18,5	17,6	18,5	17,6	18,1	18,4	12,3	15,4	19	20,7
	Бескруточная ровница	3,01	4,02	8,41	15,18	22,76	14,84	5,7	6,31	5,09	11,57	22,3	8,49

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что при секторальном разбиении поперечного сечения крученой ровницы площадь, занимаемая черными пикселями в каждом секторе, примерно одинакова. Это может свидетельствовать о рав-

номерном распределении сечений волокон в поперечном сечении ровницы в секторальном направлении. При проверке данной гипотезы с помощью критерия  $\chi^2$  Пирсона с учетом уровня значимости  $\alpha=0,05$  и количества степеней свободы 11 было

найденно значения  $k_{кр} = 26,76$ , а также вычислено значение  $k_{набл} = 4,52$ . Из выполнения условия  $k_{набл} < k_{кр}$  следует подтверждение гипотезы о равномерном распределении сечений волокон в поперечном сечении льняной ровницы в секторальном направлении.

В случае бескруточной ровницы распределение волокон по секторам не подчиняется равномерному закону. Значение  $k_{набл} = 47,7$  превосходит значение  $k_{кр} = 26,76$ . Гипотеза о нормальном распределении также опровергается соотношением между

найденными  $k_{набл} = 69,03$  и  $k_{кр} = 16,92$ . Таким образом, в качестве модели распределения сечений волокон в поперечном сечении бескруточной ровницы в секторальном направлении можно принять полученное экспериментальное распределение.

Следующим этапом в процессе исследования поперечного сечения льняной ровницы являлось определение процентного содержания черных пикселей, попавших в определенный сектор каждой окружности, от их общего количества. Результат работы программы на данном этапе представлен в табл. 2 и 3 для крученой и бескруточной ровницы соответственно.

Таблица 2

	1 круг	2 круг	3 круг	4 круг	5 круг
1 сектор	1,92	2,62	1,23	0,12	0
2 сектор	1,84	3,5	1,69	0,52	0,04
3 сектор	1,65	4,51	2,85	0,02	0
4 сектор	1,68	4,68	2,22	0	0
5 сектор	1,93	4,7	2,37	0	0
6 сектор	1,87	4	2,56	0,06	0
7 сектор	1,76	3,87	2,69	0,52	0
8 сектор	1,81	3,96	2,05	0,92	0,23
9 сектор	1,85	3,27	0,58	0,25	0,05
10 сектор	1,84	3,65	1,96	0,05	0
11 сектор	1,82	4,06	2,42	0,3	0,65
12 сектор	1,87	3,21	3,64	1,3	0,03

Таблица 3

	1 круг	2 круг	3 круг	4 круг	5 круг
1 сектор	1,29	1,02	0,04	0	0
2 сектор	1,12	1,95	0,06	0	0
3 сектор	0,98	3,81	1,75	0,01	0
4 сектор	1,82	4,19	4,83	0,97	0
5 сектор	2,56	5,19	8,13	1,85	0
6 сектор	2,37	5,46	3,71	0,02	0
7 сектор	1,33	2,71	0,4	0	0
8 сектор	1,84	1,51	1,56	0	0
9 сектор	1,49	2,29	0,18	0	0
10 сектор	1,73	2,95	4,03	0,14	0,17
11 сектор	1,22	2,14	4,8	4,18	5,02
12 сектор	1,31	2,95	2,06	0,29	0

Анализируя данные, приведенные в табл. 2, можно заметить, что внутри каждого круга с учетом разбиения на секторы попадает примерно одинаковое количество черных пикселей. Значит, при одновременном радиальном и секторальном разбиении волокна в сечении крученой ровницы располагаются равномерно.

В случае с бескруточной ровницей замечаем, что при удалении от центра распре-

деление черных пикселей в круге с учетом разбиения на секторы становится неравномерным. При моделировании поперечного сечения бескруточной ровницы в качестве модели распределения рекомендуется принять экспериментальный закон в виде полученной табл. 3.

Для установления соотношения между размерами пикселей на изображении и реальными размерами волокон получали

цифровое изображение микропровода диаметром 0,03 и 0,07 мм. Условия съемки совпадали с условиями, использовавшимися при съемке срезов ровницы. Анализ полученных изображений позволил получить масштаб для расчета размеров волокон на изображении, который составил 935 пикселей/мм.

Таким образом, на основе полученных данных может быть осуществлен переход от экспериментальных цифровых данных к реальным размерам площади поперечного сечения волокна и ровницы.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенное исследование поперечного сечения ровницы дает представление о реальном распределении волокон в сечении.

2. Для крученой и бескруточной ровницы при радиальном разбиении установлен нормальный закон распределения волокон в поперечном сечении.

3. В секторальном направлении распределение волокон в сечении крученой ровницы подчиняется равномерному закону. Для бескруточной ровницы получена экспериментальная модель распределения.

4. Полученные данные можно использовать при моделировании поперечного сечения продукта прядения с целью дальнейшего исследования и прогнозирования его прочностных свойств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рудовский П. Н., Смирнова С. Г. Математическая модель прочности мокрой бескруточной ровницы из льна. – Деп. в ВИНТИ № 82-В2010 17.02.2010.

2. Палочкин С.В., Рудовский П.Н. Влияние сил поверхностного натяжения воды на прочность некрученой мокрой льняной ровницы //Вестник МГТУ: Сборник трудов. – М.: МГТУ им. А.Н.Косыгина, 2009.

3. Кириллова Е.С., Рудовский П.Н., Соркин А.П. Влияние срока хранения увлажненной бескруточной ровницы на ее качество // Вестник Костромского государственного технологического университета. – 2006, № 13. С. 14...15.

4. Рудовский П.Н., Смирнова С.Г. Влияние обвивочных волокон на прочность некрученой ровницы из льна // Вестник Костромского государственного технологического университета. – 2010, № 1 (23). С.34...37.

5. Рудовский П.Н., Баскаков Д.А., Смирнова С.Г. Теоретический анализ влияния частоты вращения вьюрка на прочность бескруточной ровницы // Вестник Костромского государственного технологического университета. – 2014, № 1 (32). С. 19...22.

6. Палочкин С.В., Гаврилова А.Б., Рудовский П.Н., Соркин А.П. Обоснование структуры и компонентов бескруточной ровницы, получаемой обвивкой волокнистого сердечника //Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1999, № 3. С.35...40.

7. Белова И.С. Обоснование метода оценки адгезии волокнистых материалов к связующему при выработке пряжи клеевым способом// Технологии и качество. – 2019, №4(46), С. 3...7.

8. Севостьянов П.А., Забродин Д.А., Дасюк П.Е. Компьютерное моделирование в задачах исследования текстильных материалов и производств: – М.: "Тисопринт", 2014.

9. Корицкий К.И. Основы проектирования свойств пряжи. – М.: Гизлегпром, 1963.

10. Раишова И.Г. Методы оценки распределения волокон по перечным сечениям пряжи. – М.: Легкая индустрия, 1970.

11. Рудовский П.Н., Соркин А.П., Смирнова С.Г. Влияние условий формирования мокрой бескруточной ровницы на ее структуру и прочность //Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, № 3. С. 34...38.

12. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Высш школа, 1979.

## REFERENCES

1. Rudovsky P. N., Smirnova S. G. Mathematical model of the strength of a wet spinless roving made of flax. – Dept. in VINITI No. 82-V2010 17.02.2010.

2. Palochkin S.V., Rudovsky P.N. Influence of surface tension forces of water on the strength of uncoiled wet linen roving //MSTU Bulletin: Collection of works. – М.: Kosygin Moscow State Technical University, 2009.

3. Kirillova E.S., Rudovsky P.N., Sorkin A.P. The effect of the shelf life of moistened spinless roving on its quality // Bulletin of Kostroma State Technological University. – 2006. No. 13. pp. 14-15

4. Rudovsky P.N., Smirnova S.G. The influence of wrapping fibers on the strength of an uncoiled flax roving // Bulletin of Kostroma State Technological University. – 2010. No. 1 (23). pp. 34-37.

5. Rudovsky P.N., Baskakov D.A., Smirnova S.G. Theoretical analysis of the influence of the rotation frequency of the reel on the strength of a spinless roving – Bulletin of Kostroma State Technological University. – 2014. No. 1 (32). pp. 19...22.

6. Palochkin S.V., Gavrilova A.B., Rudovsky P.N., Sorkin A.P. Substantiation of the structure and components of a non-winding roving obtained by wrapping a аяfibrous core // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 1999, No. 3. pp. 35...40.

7. Belova I.S. Justification of the method of assessing the adhesion of fibrous materials to the binder in the production of yarn by the adhesive method// Technologies and quality. – 2019, No. 4(46), pp. 3...7

8. Sevostyanov P.A., Zabrodin D.A., Dasyuk P.E. Computer modeling in the problems of research of textile materials and industries: – М.: "Tiso print", 2014.

9. Koritsky K.I. Fundamentals of designing yarn properties. – М.: Gizlegprom, 1963.

10. Rudovsky P.N., Sorkin A.P., Smirnova S.G. Influence of conditions of formation of a wet spinless roving on its structure and strength // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2011, No. 3. pp. 34...38.

11. Rashkovan I.G. Methods for estimating the distribution of fibers by the pepper sections of yarn. – М.: Light industry, 1970.

12. Gmurman V.E. Guide to solving problems in probability theory and mathematical statistics. – Moscow: Higher School, 1979.

Рекомендована кафедрой теории механизмов машин, деталей машин и проектирования технологических машин КГУ. Поступила 15.11.22.

---