

УДК 004.9:677.494.674

А. Н. Бизюк, Н. Н. Ясинская

Витебский государственный технологический университет
Республика Беларусь, г. Витебск, пр. Московский, 72

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

© А. Н. Бизюк, Н. Н. Ясинская, 2017

В статье рассматривается процесс моделирования пористой структуры волокнистого материала, который предназначен для использования в качестве армирующего наполнителя при получении композиционных материалов. С целью анализа влияния технологических характеристик волокнистого материала на его пористую структуру было проведено исследование и построена имитационная модель волокнистого материала. Разработано программное обеспечение, реализующее эту модель и позволяющее определить значение пористости волокнистого материала с заданной линейной плотностью, а также получить трехмерную пространственную модель материала, которая может быть использована для моделирования процесса пропитки

Ключевые слова: текстильные композиционные материалы, имитационное моделирование, пористость, диаметр пряжи, крутка, пропитка.

Введение

Одной из основных операций при формировании большинства текстильных композитов является пропитка волокнистого материала полимерным связующим.

Пропитка коллоидных капиллярно-пористых материалов жидкостями — сложный процесс, зависящий от физико-химических свойств полимерного связующего и капиллярной структуры волокнистого материала, определяемой размерами и конфигурацией пор, их пространственным расположением [1].

Для регулирования капиллярных свойств и анализа процесса пропитки полимерным связующим необходима модель пористой структуры волокнистого армирующего материала [2]–[4].

При моделировании пористой структуры волокнистого материала, в частности пряжи определенной линейной плотности, необходимо знание поперечных размеров пряжи — диаметра, крутки, а также количества волокон в поперечном сечении. Известные формулы для расчета геометрических свойств пряжи [5, 6] не учитывают изменения объемной плотности пряжи в зависимости от линейной плотности, степени скрученности, поэтому расчетные значения геометрических и структурных свойств пряжи не совпадают с экспериментальными.

Целью работы явилось определение математических моделей для расчета диаметра и крутки пряжи, учитывающих изменения объемной плотности пряжи в зависимости от линейной плотности, степени скрученности и создание на их основе имитационной модели волокнистого материала.

Объектом исследований является хлопчатобумажная пряжа различных линейных плотностей (таблица 1), полученная классическим способом формирования.

Моделирование диаметра

Известна формула для определения диаметра пряжи на основании линейной плотности и объемной массы, которая различается для каждого вида волокна [5]:

$$d_p = 0,0357 \cdot \sqrt{T / \delta}, \quad (1)$$

где d_p — расчетный диаметр пряжи, мм; T — линейная плотность пряжи, текс; δ — объемная масса материала, г/см³.

Используемое в формуле (1) значение объемной массы указано в литературных источниках и имеет постоянное значение, зависящее только от вида волокна. В частности, для хлопчатобумажной пряжи в литературе можно встретить различные оценки объемной массы, которые к тому же имеют значительный разброс в значениях.

С целью получения модели зависимости диаметра хлопчатобумажной пряжи от ее линейной плотности был проведен эксперимент по определению диаметра. Диаметр пряжи определялся оптическим методом с помощью микроскопа и цифровой фотокамеры [6]. Цифровые снимки пряжи обрабатывались в графическом редакторе с целью определения процента площади снимка, занимаемой пряжей. Для этого снимок преобразовывался в двухцветный режим, где фон снимка был покрашен черным цветом, а пряжа — белым. Используя данные о процентном соотношении цветов на изображении, и зная размеры и масштаб изображения, который определялся путем получения снимка измерительной линейки при идентичном увеличении, можно вычислить средний диаметр пряжи. Для каждого вида пряжи осуществлялось 5 измерений, результаты усреднялись.

Полученные значения диаметра хлопчатобумажной пряжи приведены в таблице 1:

Для получения математической модели зависимости диаметра пряжи от ее линейной плотности был выбран вид регрессионного уравнения (1), а затем определены его коэффициенты по методу наименьших квадратов. Преобразуем модель (1), возведя обе части уравнения в квадрат.

$$d_p^2 = 0,0357^2 \cdot T / \delta, \quad (2)$$

Обозначим $y = d_p^2$, $x = T$, $a = 0,0357^2 / \delta$, получим

$$y = a \cdot x. \quad (3)$$

Уравнение (3) — линейное, его коэффициент a можно определить по методу наименьших квадратов.

В результате регрессионного анализа в системе Statistica были получены следующие результаты:

Результаты регрессионного анализа свидетельствуют о значимом отличии коэффициента a от 0 и статистической значимости всей модели.

Объемную массу можно рассчитать по формуле (4)

$$\delta = 0,0357^2 / a. \quad (4)$$

Получено значение объемной массы хлопчатобумажной пряжи: $\delta = 0,42493$ г/см³, а модель зависимости диаметра от линейной плотности имеет вид (5).

$$d_p = 0,0357 \cdot \sqrt{T / 0,42493}, \quad (5)$$

На рисунке 1 изображена графическая зависимость диаметра хлопчатобумажной пряжи от ее линейной плотности и экспериментальные данные измерения диаметра оптическим методом.

Моделирование крутки

Для получения математической модели зависимости крутки хлопчатобумажной пряжи от ее линейной плотности был проведен эксперимент по определению крутки для образцов хлопчатобумажной пряжи различной линейной плотности. Крутка определялась с помощью электронного круткомера путем измерения крутки 5 образцов длиной 50 см каждого вида пряжи и вычисления среднего арифметического значения. Результаты измерения представлены в таблице 3.

Модель зависимости крутки от линейной плотности должна отвечать следующим требованиям: с увеличением линейной плотности крутка уменьшается, значение крутки не принимает отрицательных значений. В качестве такой модели была выбрана экспоненциальная модель, так как она отвечает требованиям и при этом имеет всего два коэффициента.

Экспоненциальная модель зависимости крутки от линейной плотности имеет вид (6).

$$K = a_1 \cdot e^{a_2 \cdot T}, \quad (6)$$

где K — крутка пряжи, об/м; a_1, a_2 — регрессионные коэффициенты; T — линейная плотность пряжи, текс. Для определения коэффициентов регрессионной модели сначала линеаризуем ее. Для этого прологарифмируем обе части уравнения и введем замену пере-

Таблица 1. Экспериментальный диаметр хлопковой пряжи

Линейная плотность, текс	Экспериментальный диаметр, мм
9,4	0,17
15,9	0,19
14,8	0,187
16,2	0,188
18,3	0,22
17,3	0,20
21,5	0,24
25,6	0,25
31,3	0,31
38,6	0,376
49,4	0,393

Таблица 2. Результаты регрессионного анализа для объемной массы

Коэффициент a	0,002999
Стандартная ошибка	0,000137
Критерий Стьюдента t	21,93398
p-level критерия Стьюдента	$< 10^{-6}$
Коэффициент детерминации R^2	0,9796
F-тест Фишера	481,099
p-level теста Фишера	$< 10^{-6}$

Таблица 3. Крутка хлопковой пряжи

Линейная плотность, текс	Крутка, об/м
9,4	885,4
15,9	811,2
14,8	727,2
16,2	822,4
18,3	737,8
17,3	598,8
21,5	552,4
25,6	484,8
31,3	481,4
38,6	347,2
49,4	262,6

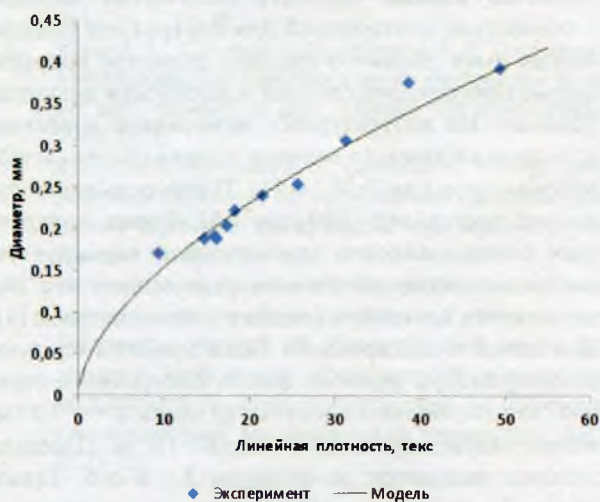


Рис. 1. Графическая зависимость диаметра хлопковой пряжи от линейной плотности

Таблица 4. Результаты регрессионного анализа для крутки

Коэффициент b_1	7,042
Стандартная ошибка	0,061
Критерий Стьюдента t	115,38
p-level критерия Стьюдента	$< 10^{-6}$
Коэффициент b_2	-0,03
Стандартная ошибка	0,002
Критерий Стьюдента t	12,72
p-level критерия Стьюдента	$< 10^{-6}$
Коэффициент детерминации R^2	0,0947
F-тест Фишера	161,84
p-level теста Фишера	$< 10^{-6}$

менных: $y = \ln(K)$, $b_1 = \ln(a_1)$, $b_2 = a_2$, $x = T$. Получим линейное уравнение (7).

$$y = b_1 + b_2 \cdot x, \tag{7}$$

Коэффициенты линейной регрессионной модели (7) определяем по методу наименьших квадратов. В результате регрессионного анализа в системе Statistica были получены следующие результаты:

Результаты регрессионного анализа свидетельствуют о значимом отличии коэффициентов b_1 и b_2 от 0 и статистической значимости всей модели.

Уравнение (7) таким образом примет вид (8)

$$y = 7,042 - 0,03 \cdot x \tag{8}$$

а экспоненциальная модель (6) при $a_1 = e^b = 1143,7$ примет вид (9).

$$K = 1143,7 \cdot e^{-0,03T}, \tag{9}$$

На рисунке 2 изображена графическая зависимость крутки от линейной плотности и экспериментальные значения крутки.

Определение количества волокон в поперечном сечении пряжи

Непосредственный подсчет количества волокон для хлопчатобумажной пряжи вызывает трудности, так как волокна имеют малый диаметр и их количество велико. Оценить количество волокон с точностью, достаточной для построения модели, можно имея данные о среднем диаметре волокон, форме поперечного сечения и плотности вещества волокон. Из литературных источников известно, что средний диаметр волокон хлопка составляет 20 микрометров или $2 \cdot 10^{-5}$ м [1]. Плотность вещества хлопка составляет 1500 кг/м^3 [5]. Форма поперечного сечения волокон хлопка сильно варьируется, но большинство источников утверждает, что она не является круглой, а близка к эллипсовидной [1]. Для целей моделирования были приняты следующие параметры волокна: форма поперечного сечения: эллипс, большая полуось эллипса: $a = 1 \cdot 10^{-5}$ м, малая полуось эллипса: $b = 0,667 \cdot 10^{-5}$ м. Площадь эллипса находится по формуле $S = \pi \cdot a \cdot b$. Таким образом, можно вычислить массу одного волокна заданной длины и определить приблизительное количество волокон в поперечном сечении пряжи,

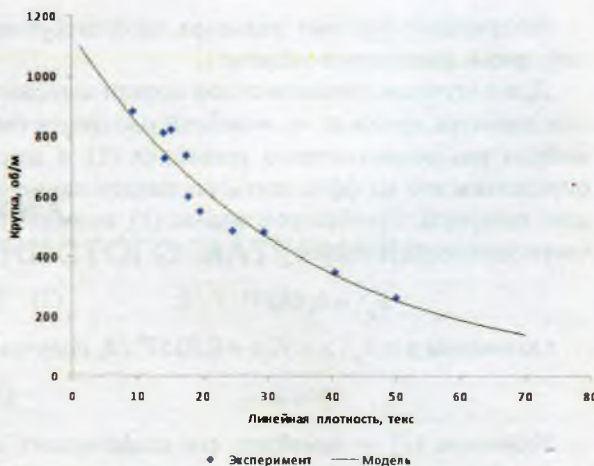


Рис. 2. График зависимости крутки хлопковой пряжи от линейной плотности

поделив массу отрезка пряжи на массу одного волокна (10).

$$N_s = m_n / m_s, \tag{10}$$

где N_s — количество волокон, шт; m_n — масса отрезка пряжи, г; m_s — масса одного волокна, г. Чтобы вычислить массу одного волокна, нужно знать площадь поперечного сечения волокна и его длину. Длина волокна в отрезке пряжи будет зависеть от крутки пряжи. Если предположить, что волокно в пряже закручено в виде винтовой линии, то ее длину можно найти по формуле (11).

$$L = l / b \cdot \sqrt{a^2 + b^2}, \tag{11}$$

где L — длина винтовой линии, м; l — длина проекции винтовой линии на горизонтальную ось (длина отрезка пряжи), м; a — радиус спирали, м; b — находится по формуле (12).

$$b = l / (2 \cdot \pi \cdot K), \tag{12}$$

где K — крутка пряжи, об/м. Крутку можно вычислить по формуле (9).

Таким образом, для исследованных образцов хлопчатобумажной пряжи можно оценить количество волокон в поперечном сечении. Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Для имитационного моделирования пористой структуры волокнистого материала разработано программное обеспечение на языке C++ [7], внешний вид которого представлен на рисунке 3.

В результате использования полученных математических моделей (5), (9), а также формулы для вычисления количества волокон (10) в приложении для имитационного моделирования волокнистого материала, для построения модели хлопчатобумажной пряжи, достаточно указать ее линейную плотность. На рисунке 4 показаны результаты расчета пористости с помощью имитационной модели и экспериментальные значения пористости, рассчитанные по известным значениям линейной плотности и диаметра образцов хлопчатобумажной пряжи.

Таблица 5. Количество волокон в образцах хлопчатобумажной пряжи

Линейная плотность, текс	Количество волокон, шт
9,4	30
15,9	45
14,8	46
16,2	49
18,3	56
17,3	58
21,5	63
25,6	80
31,3	95
38,6	133
49,4	169



Рис. 3. Интерфейс приложения для имитационного моделирования волокнистых материалов

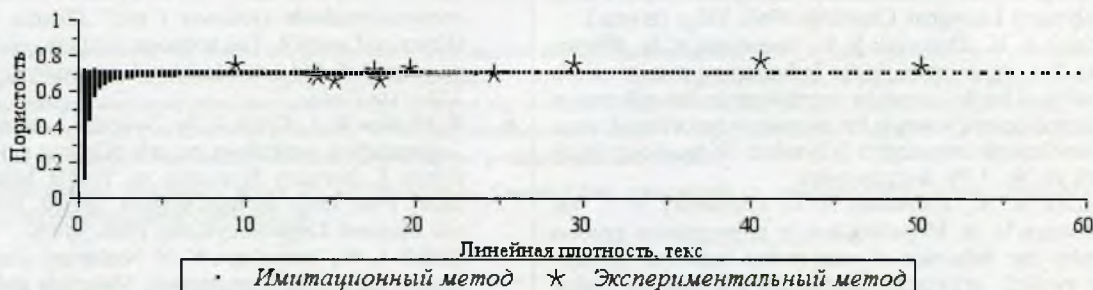


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные значения пористости хлопчатобумажной пряжи

Экспериментальные значения истинной пористости определялись по формуле (13)

$$P_3 = 1 - V_B / V_H, \quad (13)$$

где P_3 — экспериментальная пористость; V_B — общий объем вещества волокон; V_H — общий объем нити.

Из рисунка 4 видно, что пористость смоделированного имитационным методом волокнистого продукта с использованием математических зависимостей диаметра, крутки пряжи от линейной плотности и формулы для расчета количества волокон в поперечном сечении пряжи хорошо согласуется с экспериментальными значениями пористости образцов хлопчатобумажной пряжи.

Таким образом, в результате анализа результатов экспериментальных исследований получены регрессионные модели зависимости диаметра и крутки хлопчатобумажной пряжи от линейной плотности, а также разработан метод расчета количества волокон в поперечном сечении хлопчатобумажной пряжи. Полученные модели использованы при разработке приложения для моделирования пористой структуры волокнистого материала из хлопчатобумажных волокон имитационным методом.

Список литературы

1. *Вуюцкий С. С.* Физико-химические основы пропитывания и импрегнирования волокнистых систем водными дисперсиями полимеров. Ленинград: Химия, 1969. 336 с.

2. *Бизюк А. Н., Жерносек С. В., Ясинская Н. Н., Ольшанский В. И.* Оптимизация технологического процесса формирования текстильных композиционных материалов в условиях воздействия электромагнитных волн СВЧ- и ИК-диапазона // *Химическая технология*, 2015, Т. 16. №1. С. 6–12.

3. *Бизюк А. Н., Жерносек С. В., Ольшанский В. И., Ясинская Н. Н.* Моделирование процесса пропитки текстильных материалов под действием СВЧ-излучения // *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности*, 2014, Т. 23, №1. С. 16–18.

4. *Бизюк А. Н., Жерносек С. В., Ясинская Н. Н., Ольшанский В. И.* Исследование пропитки текстильных материалов в поле СВЧ излучения // *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2014, №1 (26). С. 21–28.

5. *Кукин Г. Н., Соловьев А. Н., Кобляков А. И.* Текстильное материаловедение (волокна и нити): учебник для вузов, 2-е изд., перераб. и доп., Москва, Легпромбытиздат, 1989. 352 с.

6. *Кобляков А. И., Кукин Г. Н., Соловьев А. Н. и др.* Лабораторный практикум по текстильному материаловедению: Учеб. пособ. для вузов, 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Легпромбытиздат, 1986. 344 с.: ил.

7. *Бизюк А. Н., Ясинская Н. Н.* Численное моделирование пропитки многослойных текстильных материалов. // *Материалы докладов 48 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной 50-летию университета в 2 т.* Витебский государственный технологический университет, 2015. С. 23–25.

A. N. Biziuk, N. N. Yasinskaya

Vitebsk State Technological University
Republic of Belarus, Vitebsk, Moskovskiy pr., 72

Modeling of geometrical and structural properties of fiber material for textile composites

The article deals with the process of modeling the porous structure of a fibrous material, which is intended for use as reinforcing filler in the production of composite materials. In order to analyze the influence of the technological characteristics of the fibrous material on its porous structure, a study was conducted and a simulation model of the fibrous material was constructed. A software has been developed that implements this model and makes it possible to determine the porosity of a fibrous material with a given linear density, and also to obtain a three-dimensional spatial model of material that can be used to simulate the impregnation process.

Keywords: textile composite materials, imitation modeling, porosity, yarn diameter, twist, impregnation.

References

1. Voyutskiy S. S. *Fizikohimicheskie osnovy propityvaniya i ipregnirovaniya voloknistyh sistem vodnymi dispersijami polimerov* [Physicochemical foundations of impregnation and impregnation of fibrous systems with aqueous dispersions of polymers]. Leningrad: Chemistry, 1969. 336 p. (in russ.).
2. Biziuk A. N., Zhernosek S. V., Yasinskaya N. N., Olshansky V. I. Optimization of the technological process of formation of textile composite materials under the influence of electromagnetic waves in the microwave and infrared range. *Himicheskaja tehnologija* [Chemical Technology], 2015. Vol. 16. No. 1. Pp. 6–12 (in russ.).
3. Biziuk A. N., Zhernosek S. V., Olshansky V. I., Yasinskaya N. N. Modeling textile impregnation process under the influence of microwave radiation *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnologija legkoj promyshlennosti* [Proceedings of the higher educational institutions. Technology of light industry], 2014. Vol. 23, No 1. Pp. 16–18. (in russ.).
4. Biziuk A. N., Zhernosek S. V., Yasinskaya N. N., Olshansky V. I. (2014), Study of the impregnation of textile materials in the field of microwave radiation. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Vitebsk State Technological University], 2014. No. 1 (26). Pp. 21–28 (in russ.).
5. Kukin G. N., Soloviev A. N., Koblyakov A. I. *Tekstil'noe materialovedenie (volokna i niti)* [Textile Materials (fibers and yarns)]. The textbook for high schools, 2nd ed., Revised. and ext. Moscow: Legprombytizdat. 1989. 352 p. (in russ.).
6. Koblyakov A. I., Kukin G. N., Soloviev A. N. and others. *Laboratornyj praktikum po tekstil'nomu materialovedeniju* [Laboratory Workshop on Textile Material Science]. Proc. Help. for high schools, 2nd ed., revised. and ext. Moscow. Legprombytizdat, 1986. 344 p.
7. Biziuk A. N., Yasinskaya N. N. Numerical simulation of multi-layer textile impregnation. *Materialy dokladov 48 Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii prepodavatelej i studentov, posvjashhennoj 50-letiju universiteta v 2 t.* [Proceedings of the 48 International scientific-technical conference of teachers and students dedicated to the 50th anniversary of the University in 2 vol.] Vitebsk State Technological University, 2015. Pp. 23–25 (in russ.).