

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ АРМИРУЮЩИХ ХИМИЧЕСКИХ НИТЕЙ

SIMULATION MODELING OF POROUS STRUCTURE OF REINFORCING CHEMICAL THREADS

А.Н. Бизюк, Н.Н. Ясинская*

Витебский государственный технологический университет

УДК 004.9:677.494.674

A. Biziuk, N. Yasinskaya*

Vitebsk State Technological University

РЕФЕРАТ

ВОЛОКНИСТЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОЛИЭФИР, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПОРИСТОСТЬ, ПРОПИТКА

В статье рассматривается процесс пропитки армирующих волокнистых наполнителей из химических волокон в процессе получения волокнистых полимерных композиционных материалов. Пропитка является одним из самых важных этапов производства таких материалов, влияющим на эксплуатационные характеристики готовых изделий. На качество пропитки сильное влияние оказывает пористая структура армирующего волокнистого материала. С целью анализа процесса пропитки и регулирования капиллярных свойств армирующего волокнистого материала было проведено моделирование его пористой структуры. Разработана математическая модель и на ее основе создано программное обеспечение, выполняющее имитационное моделирование пористой структуры волокнистого материала. Произведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, которое показало высокую точность модели.

ABSTRACT

FIBROUS POLYMER COMPOSITE MATERIALS, POLYETHER, SIMULATION MODELING, POROSITY, IMPREGNATION

The article describes the process of impregnating of reinforcing fibrous fillers made from chemical fibers during the production of fibrous polymeric composites. The impregnation is one of the most important stages of the production of such materials, affecting the operating characteristics of finished products. Strong influence on the quality of impregnation has a porous structure of a reinforcing fiber material. In order to analyze the impregnation process and regulation of the capillary properties of the reinforcing fibrous material, simulation of its porous structure was carried out. The mathematical model and software based on it that performs the simulation of the porous structure of the fiber material was created. Comparison of simulation results with experimental data was conducted, which showed high accuracy of the model.

ВВЕДЕНИЕ

Волокнистые полимерные композиционные материалы и изделия из них обладают рядом уникальных свойств. Это определяет их широкое применение в различных отраслях современного производственного комплекса. Для армирования волокнистых полимерных композиционных материалов широко используются армирующие

волокнистые наполнители из химических волокон, которые входят в состав композита в виде коротких волокон, нитей, жгутов, тканей, нетканых материалов и других волокнистых структур. Одним из способов формирования волокнистых полимерных композиционных материалов является пропитка армирующего волокнистого наполнителя полимерным связующим [1, 4-8].

* E-mail: yasinskaynn@rambler.ru (N. Yasinskaya)

Требования обеспечения заданной прочности материала при производстве волокнистых полимерных композиционных материалов могут быть выполнены только при реализации качественной пропитки волокнистого наполнителя связующим (матрицей).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Недостаточная пропитка полимерным связующим волокнистых наполнителей в процессе производства ведет к снижению эксплуатационных характеристик и преждевременному разрушению изделий из волокнистых полимерных композиционных материалов.

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.

Капиллярная структура волокнистого материала складывается из микроструктуры вещества волокна, из которого оно состоит, и из макроструктуры волокнистого материала [1]. Проникновение связующего вглубь капилляров, имеющих в отдельных волокнах, в особенности за то короткое время, в течение которого происходит пропитывание, не может быть значительным. Несоизмеримо большее значение для практики имеет проникновение связующего в пространство между волокнами или нитями волокнистого материала [8].

Для регулирования капиллярных свойств, создания армирующего волокнистого материала с заданной пористостью, а также анализа процесса его пропитки полимерным связующим необходима модель пористой структуры волокнистого армирующего материала.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА

Создание имитационной модели пористой структуры волокнистого материала для описания его пропитки связующим целесообразно начать с решения вопросов расположения волокон в пространстве, взаимодействия между отдельными волокнами, определения геометрических свойств волокнистого материала, а также случайного изменения свойств материала по длине и площади, то есть неровноту.

Моделирование пористой структуры волокнистого материала рассмотрим на примере пряжи с заданной линейной плотностью, круткой, диаметром. В пряже волокна располагаются по винтовым линиям переменного шага и радиуса. Каждое волокно по своей длине лежит не в одном слое пряжи, а в ряде слоев, переходя от центра пряжи к периферии и обратно [2].

Волокнистый материал в модели состоит из заданного количества волокон, которое можно определить, зная линейную плотность, их средний диаметр и плотность вещества. Каждое волокно описывается набором из конечного числа точек в пространстве. Расположение точек каждого волокна в пространстве задается параметрическим уравнением спирали:

$$\begin{cases} y = b \cdot t, \\ x = a \cdot \sin(t), \\ z = a \cdot \cos(t), \end{cases} \quad (1)$$

где x, y, z – координаты в пространстве, m ; a – радиус спирали, m ; b/a – угловой коэффициент спирали; t – параметр дискретизации.

Для того, чтобы расстояние между точками не зависело от параметров спирали (диаметр, количество витков, длина), использована формула длины дуги спирали:

$$L = l/b \cdot \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (2)$$

где L – длина дуги спирали, m ; l – длина проекции спирали на ось y, m .

Для моделирования спирали нужно задать длину проекции l на ось y , количество витков спирали k , радиус спирали a и шаг дискретизации d . Тогда b можно найти по формуле:

$$b = l / (2 \cdot \pi \cdot k). \quad (3)$$

Учитывая (2), описать спираль радиуса a , с количеством витков k , длиной вдоль оси y равной L , и шагом дискретизации d можно следующими формулами:

$$\begin{cases} t = \frac{t_2}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \\ y = b \cdot t, \text{ при } t_2 \in [0, L] \text{ с шагом } d. \\ x = a \cdot \sin(t), \\ z = a \cdot \cos(t), \end{cases} \quad (4)$$

Для моделирования отрезка волокнистого материала нужно сгенерировать несколько волокон со случайными параметрами: радиус спирали a , количество витков k , смещение витков вдоль оси y равно r_2 , смещение волокна вдоль оси x равно r_1 , смещение волокна вдоль оси z равно r_3 . Тогда формулы (4) примут вид:

$$\begin{cases} t = \frac{t_2}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \\ y = b \cdot t, \\ x = a \cdot \sin\left(t + \frac{r_2}{b}\right) + r_1, \\ z = a \cdot \cos\left(t + \frac{r_2}{b}\right) + r_3, \end{cases} \text{ при } t_2 \in [0, L] \text{ с шагом } d. \quad (5)$$

Необходимой линейной плотности, диаметра и равномерного распределения волокон по толщине волокнистого материала можно добиться, задавая диапазоны изменения случайных величин в модели.

На рисунке 1 изображено волокно, смоделированное согласно формулам (3), (5). Количество витков k выбрано равным 4. Показаны смещения r_1, r_2, r_3 волокна относительно начального положения. Для каждого волокна эти смещения, а также радиус спирали a , выбираются случайным образом, что образует картину, видимую на рисунке 2.

На рисунке 2 изображены результаты имитационного моделирования пряжи с различной линейной плотностью и пористостью и виды по-

перечных сечений.

Модель волокнистого материала (5) используется при разработке программного обеспечения для определения пористости при заданной линейной плотности, крутке и диаметре волокнистого материала.

В результате моделирования волокнистого продукта можно определить истинную пористость, то есть объем пор, содержащихся в определенном объеме пряжи (комплексной нити).

Истинная пористость модели находится по формуле (6):

$$P_u = \left(1 - \overline{V}_s / \overline{V}_o\right) \cdot 100, \quad (6)$$

где P_u – истинная пористость модели, %; \overline{V}_s – суммарный объем вещества волокон, m^3 ; \overline{V}_o – общий объем нити, m^3 .

При вычислении общего объема нити учитывалось, что при смачивании нити жидкостью, жидкость накапливается не только внутри нити, но и на ее поверхности, образуя пленку. Чтобы учесть этот эффект при расчете пористости, в модель введен эмпирический коэффициент увеличения диаметра нити, который должен быть определен экспериментально для каждого типа вещества нитей. Для полиэфирного материала этот коэффициент равен 1,36. Диаметр нитей вычислялся по цифровым фотографиям, полученным с помощью микроскопа [3].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТОСТИ ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА

В результате экспериментальных исследований можно определить кажущуюся пористость волокнистого материала, то есть объем незамкнутых пор, способных заполняться жидкостью.

Кажущуюся пористость волокнистого материала определяли путем заполнения капиллярных пространств образца комплексной полиэфирной нити жидкостью, полностью смачивающей волокно. В качестве такой жидкости в результате предварительных опытов был выбран этиловый спирт, показывающий краевой угол на синтетическом волокне, близкий к нулю.

Предварительно взвешенный образец полиэфирной нити погружали в спирт при комнат-

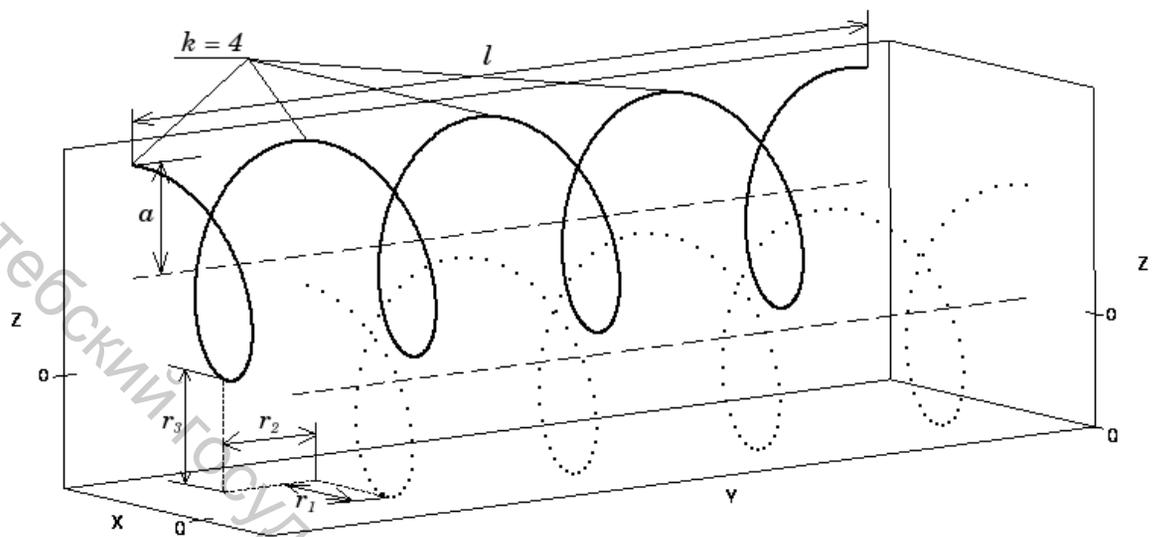


Рисунок 1 – Модель волокна

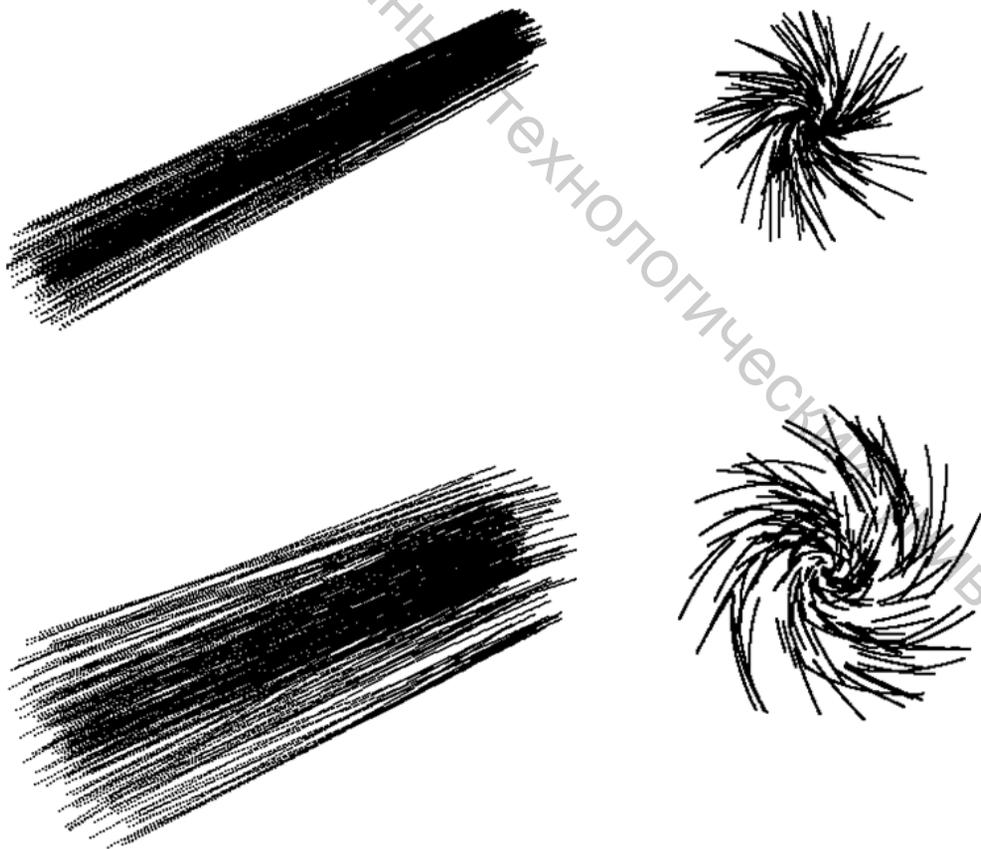


Рисунок 2 – Имитационная модель волокнистого материала (пряжи, комплексной нити)

ной температуре (18–22 °С). Предварительные исследования показали, что продолжительность погружения полиэфирной нити в спирт не влияет на результат определения кажущейся пористости. Это подтверждает очень хорошее смачивание волокнистого материала спиртом и указывает на то, что процесс проникновения спирта в те поры, в которые он способен проникнуть, практически заканчивается за несколько секунд. После пропитки образец вынимали с такой скоростью, чтобы спирт успевал стечь с поверхности нити, и проводили взвешивание.

Расчет кажущейся пористости волокнистых материалов по результатам эксперимента проводился по формуле (7):

$$P_{\kappa} = \left(1 - \frac{\bar{V}_m}{\bar{V}_{\text{жс}} + \bar{V}_m}\right) \cdot 100, \quad (7)$$

где P_{κ} – кажущаяся пористость, %; \bar{V}_m – средний объем материала волокон (филаментов), м^3 ; $\bar{V}_{\text{жс}}$ – средний объем впитанной жидкости, м^3 .

Для определения среднего объема материала волокон использовались данные о средней массе образцов и плотности материала волокон (филаментов):

$$\bar{V}_m = \bar{m}_m / \rho_m, \quad (8)$$

где \bar{m}_m – средняя масса образца волокнистого материала, кг ; ρ_m – плотность материала волокон (филаментов), $\text{кг}/\text{м}^3$.

Объем жидкости определялся по формуле:

$$\bar{V}_{\text{жс}} = \bar{m}_{\text{жс}} / \rho_{\text{жс}}, \quad (9)$$

где $\bar{m}_{\text{жс}}$ – средняя масса впитанной жидкости, кг ; $\rho_{\text{жс}}$ – плотность пропитывающей жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$.

При расчетах использовались данные о плотностях материала и пропитывающей жидкости, приведенные в таблице 1.

На рисунке 3 представлена графическая за-

висимость показателя истинной пористости от линейной плотности и диаметра, рассчитанная для смоделированной полиэфирной комплексной нити с использованием разработанного программного обеспечения, а также экспериментально определенные значения пористости для 5 образцов полиэфирной нити.

Результаты экспериментальных исследований и расчет кажущейся пористости полиэфирной комплексной нити при различных значениях диаметра и линейной плотности нитей представлены в таблице 2.

Из приведенных на графике данных видно, что пористость волокнистого материала может достигать 80 % и выше, что подтверждается данными литературных источников [1]. Кроме того, установлено, что отклонения значений истинной (расчетной) и кажущейся (экспериментальной) пористости для полиэфирной комплексной нити составляют 5–6 %, что позволяет считать модель достаточно точной.

Полученные результаты моделирования волокнистого материала и экспериментальных исследований подтверждают возможность использования разработанного программного обеспечения в технологических расчетах при проектировании армирующих волокнистых материалов для пропитки их связующими.

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель волокнистого материала с заданной линейной плотностью и диаметром. На основе разработанной математической модели создано программное обеспечение, позволяющее создавать имитационные модели пористой структуры пряжи (комплексной нити) со случайным расположением волокон (филаментных нитей). Проведены экспериментальные исследования пористости текстильных волокнистых материалов и подтверждена высокая точность моделирования армирующих текстильных материалов из гидрофобных волокон. Разработанное программное обеспечение может использоваться для прогнозирования процесса пропитки в процессе производства волокнистых полимерных композиционных материалов.

Таблица 1 – Плотность материалов

Название	Плотность, кг/м ³
Полиэфирное волокно	1390
Этиловый спирт	789

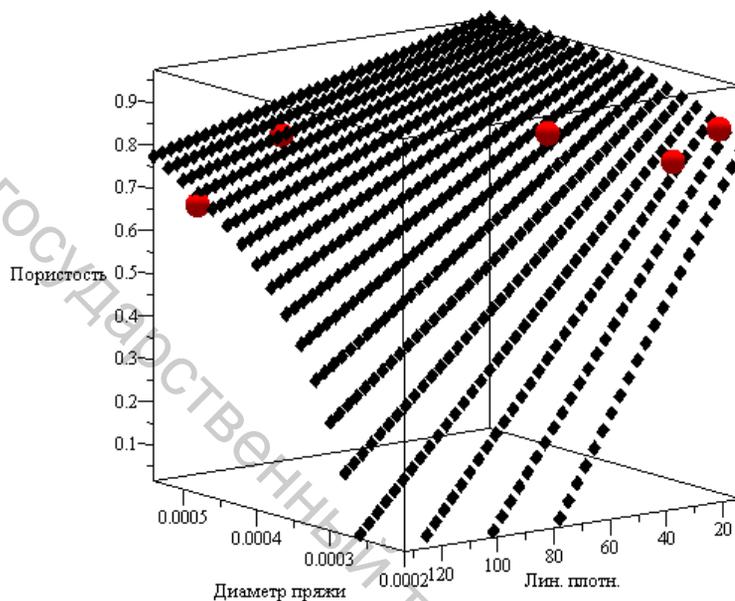


Рисунок 3 – Результаты расчета пористости

Таблица 2 – Сравнение модели с экспериментальными значениями

N	Эксперимент			Модель
	Линейная плотность, текс	Диаметр нити, D, м	Пористость, P, %	Пористость, P _м , %
1	28	0,00024	79,8	75,7
2	17	0,00022	87,3	82,3
3	46	0,00034	83,5	80,1
4	133	0,00048	68,9	71,7
5	93	0,00052	79,2	83,1

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Воюцкий, С.С. (1969), *Физикохимические основы пропитывания и ипрегнирования волокнистых систем водными дисперсиями полимеров*, Ленинград, Химия, 336 с.
2. Кукин, Г.Н., Соловьев, А.Н., Кобляков, А.И. (1989), *Текстильное материаловедение (волокна и нити) : учебник для вузов, 2-е изд., перераб. и доп.*, Москва, Легпромбытиздат, 352 с.
3. Кобляков, А.И., Кукин, Г.Н., Соловьев, А.Н. и др. (1986), *Лабораторный практикум по текстильному материаловедению: учеб. пособ. для вузов, 2-е изд., перераб. и доп.*, Москва, Легпромбытиздат, 344 с.: ил.
4. Бизюк, А.Н., Ясинская, Н.Н. (2015), 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.
5. Бизюк, А.Н., Жерносек, С.В., Ясинская, Н.Н., Ольшанский, В.И. (2015), 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.
6. Бизюк, А.Н., Жерносек, С.В., Ольшанский, В.И., Ясинская, Н.Н. (2014), Исследование влияния СВЧ-излучения на показатели качества тканых полотен, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 2014, № 2 (350), С. 17-20.
7. Бизюк, А.Н., Жерносек, С.В., Ольшанский, В.И., Ясинская, Н.Н. (2014), Моделирование процесса пропитки текстильных материалов под действием СВЧ-излучения, *Известия высших*

REFERENCES

1. Voyutskiy, S.S. (1969), *Fizikohimicheskie osnovy propityvaniya i ipregnirovaniya voloknistykh sistem vodnymi dispersijami polimerov* [Physicochemical foundations of impregnation and impregnation of fibrous systems with aqueous dispersions of polymers], Leningrad, Chemistry, 336 p.
2. Kukin, G.N., Soloviev, A.N., Koblyakov, A.I. (1989), *Tekstil'noe materialovedenie (volokna i niti) : uchebnik dlja vuzov, 2-e izd., pererab. i dop* [Textile Materials (fibers and yarns): the textbook for high schools, 2 ed., suppl. and revised], Moscow, Legprombytizdat, 352.
3. Koblyakov, A.I, Kukin, G.N., Soloviev, A.N. and others (1986), *Laboratornyj praktikum po tekstil'nomu materialovedeniju: ucheb. posob. dlja vuzov, 2-e izd., pererab. i dop.* [Laboratory Workshop on Textile Material Science: Proc. Help. for high schools, 2 ed., suppl. and revised], Moscow, Legprombytizdat, 344 p. : ill.
4. Biziuk, A.N., Yasinskaya, N.N. (2015), Numerical simulation of multi-layer textile impregnation [Chislennoe modelirovanie propitki mnogoslojnyh tekstil'nyh materialov], *Proceedings of the 48 International scientific-technical conference of teachers and students dedicated to the 50th anniversary of the University of 2 t.*, the Vitebsk State Technological University, 2015, pp. 23-25.
5. Biziuk, A.N., Zhernosek, S.V., Yasinskaya, N.N., Alshanski, V.I. (2015), Optimization of the technological process of formation of textile composite materials under the influence of electromagnetic waves in the microwave and infrared range [Optimizacija tehnologičeskogo processa formirovanija tekstil'nyh kompozicionnyh materialov v uslovijah vozdejstvija jelektromagnitnyh voln SVCh- i IK-diapazona], *Chemical Technology*, 2015, T. 16. No. 1, P. 6-12.
6. Biziuk, A.N., Zhernosek, S.V., Alshanski, V.I., Yasinskaya, N.N. (2014), Investigation of the

учебных заведений. *Технология легкой промышленности*, 2014, Т. 23, № 1, С. 16-18.

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

effect of microwave radiation on the quality of woven fabrics [Issledovanie vlijaniya SVCh-izluchenija na pokazateli kachestva tkanyh poloten], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti – The New of higher educational institution. Technology of the Textile Industry*, 2014, No. 2 (350), pp. 17-20.

7. Biziuk, A.N., Zhernosek, S.V., Alshanski, V.I., Yasinskaya, N.N. (2014), Modeling textile impregnation process under the influence of microwave radiation [Modelirovanie processa propitki tekstil'nyh materialov pod dejstviem SVCh-izluchenija], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Tehnologija legkoj promyshlennosti – Proceedings of the higher educational institutions. Technology of Light Industry*, 2014, Vol. 23, No. 1, P. 16-18.
8. Biziuk, A.N., Zhernosek, S.V., Yasinskaya, N.N., Alshanski, V.I. (2014), Study of the impregnation of textile materials in the field of microwave radiation [Issledovanie propitki tekstil'nyh materialov v pole SVCh izluchenija], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – Vestnik of the Vitebsk State Technological University*, 2014, No. 1 (26), pp. 21-28.

Статья поступила в редакцию 09. 03. 2017 г.