

УДК 677.024

DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_6\_279

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРОЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТКАНИ  
ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
И КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫЙ АНАЛОГ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ЕЕ ПАРАМЕТРОВ\***

**MATHEMATICAL MODEL OF A TECHNICAL FABRIC STRUCTURE  
FOR REINFORCEMENT OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS  
AND FINITE-DIFFERENCE ANALOGUE  
FOR CALCULATION OF ITS PARAMETERS**

*С.Г. СТЕПАНОВ, Л.Б. МАСЛОВ, В.М. ДЖАНПАИЗОВА, Г.Ф. САГИТОВА,  
Д.А. ЖУНИСБЕКОВА, А.Ж. СУЙГЕНБАЕВА*

*S.G. STEPANOV, L. B. MASLOV, V.M. JANPAIZOVA, G.F. SAGITOVA,  
D.A. ZHUNISBEKOVA, A.ZH. SUIGENBAEVA*

*(Ивановский государственный политехнический университет, Россия,  
Ивановский государственный энергетический университет, Россия,  
Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан)*

*(Ivanovo State Polytechnic University, Russia,  
Ivanovo State Power Engineering University, Russia,  
M. Auezov South Kazakhstan State University, Republic of Kazkhstan)*

E-mail: step-sg@mail.ru

*Проанализированы достоинства и недостатки полимерных композиционных материалов, армированных тканями. Исследована структура технической ткани полотняного переплетения, применяемой для армирования полимерных композиционных материалов, получены расчетная, математическая модели ее строения и конечно-разностный аналог для расчета параметров ткани.*

*The advantages and disadvantages of polymer composite materials reinforced with fabrics are analyzed. The structure of a technical fabric of a plain weave used for reinforcing polymer composite materials has been investigated, a computational, mathematical model of its structure and a finite-difference analogue for calculating the parameters of the fabric have been obtained.*

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ивановской области в рамках научного проекта № 20-41-370002.

**Ключевые слова:** классификация по материалу нитей и видам главных переплетений тканых армирующих материалов, техническая ткань, сверхвысокомодульные нити, армирование полимерных композиционных материалов, расчетная и математическая модели строения ткани, конечно-разностный аналог, численный расчет параметров строения ткани.

**Keywords:** classification by thread material and types of main weaves of woven reinforcing materials, technical fabric, super-high modulus threads, reinforcement of polymer composite materials, computational and mathematical models of the fabric structure, finite-difference analogue, numerical calculation of the parameters of the fabric structure.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) в настоящее время относятся к наиболее востребованному и быстро развивающемуся виду композитов. При этом особое место занимают ПКМ с наполнителями в виде тканей из волокон различной природы [1...15]. Тканые материалы из высокопрочных и высокомодульных волокон для производства ПКМ могут быть классифицированы по материалу нитей и видам главных переплетений [16].

Изделия из ПКМ, полученные на основе однослойных тканых армирующих материалов, по сравнению с полимерными композитами, сформированными из лент из однонаправленных волокон, имеют ряд преимуществ, а именно: 1) воспринимают нагрузку в ткани волокна и основы и утка со связующими, и как, следствие этого, – высокая прочность в слое композита в 2-х направлениях проложенных волокон; 2) хорошая связность армирующего слоя из-за переплетения волокон; 3) лучшее смачивание волокна матрицей в процессе пропитки из-за наличия зазоров между волокнами, обусловленных их переплетением; 4) лучше адгезия связующего с изогнутыми и переплетенными волокнами.

Однако ПКМ на основе тканых армирующих материалов имеют недостатки: 1) меньше плотность укладки одной системы волокон из-за переплетения с другой системой волокон; 2) меньшая жесткость композита из-за искривления волокон в ткани; 3) падение прочности волокон из-за повреждения при переработке в ткань.

Отмеченные недостатки не перевешивают в большинстве случаев положительные стороны использования тканых арми-

рующих материалов при производстве ПКМ, поэтому последние являются востребованными и распространенными.

В связи с вышеизложенным актуальной становится проблема исследования структуры, моделирования, разработки методики расчета и проектирования технических тканей для армирования ПКМ.

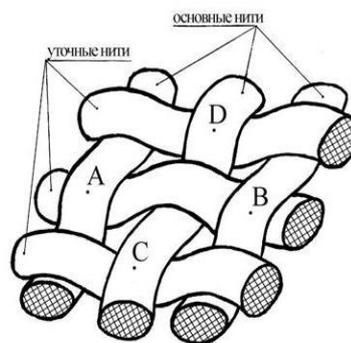


Рис. 1

#### *Основные нити*

Рассмотрим структуру тканей полотняного переплетения (рис. 1 – взаимодействие нитей основы и утка в ткани полотняного переплетения). Для армирования ПКМ такую ткань изготавливают из высокопрочных и высокомодульных нитей, например, из сверхвысокомодульных (СВМ) термостойких нитей. Точки А, В, С, D на рис.1 принадлежат центрам пятен контакта между нитями основы и утка в ткани. Анализируя взаимодействия нитей в переплетении, приходим к выводу, что контактное взаимодействие основы и утка в точках А и С (а также в точках В и D) ткани полностью идентично. Следовательно, в этих точках должны быть равны силы, действующие со

стороны утка на основу и со стороны основы на уток.

На основании вышеизложенного приходим к следующей расчетной модели ткани полотняного переплетения (рис. 2 – расчетные модели отрезков основной и уточной нитей и действующие на них внешние и внутренние силы).

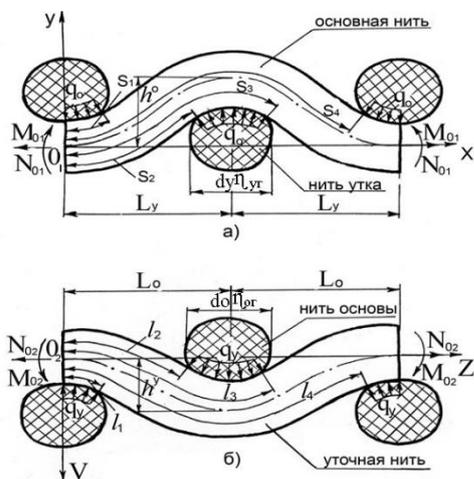


Рис. 2

#### Уточные нити

Отрезок основы АВ (рис. 1) соответствует отрезку основной нити (рис. 2-а), а отрезок утка CD отрезку уточной нити (рис. 2-б). Эти отрезки утка и основы представляют собой элемент ткани. Они взаимно переплетены и взаимодействуют друг с другом. Считаем, что в зонах контакта нитей действуют распределенные нагрузки интенсивностью и  $Q_y$ , которые принимаем

$$A_o \left[ \frac{d^3 \phi}{dx^3} \cos^2 \phi - 2 \frac{d^2 \phi}{dx^2} \frac{d\phi}{dx} \sin 2\phi - \left( \frac{d\phi}{dx} \right)^3 (1,5 \cos^2 \phi - 1) \right] - \quad (1)$$

$$- \left[ 0,5 A_o \left( \frac{d\phi}{dx} \right)_{x=0}^2 + N_{01} \right] \frac{d\phi}{dx} + \frac{1}{\cos \phi} T_0(x) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \phi,$$

$$A_y \left[ \frac{d^3 \alpha}{dZ^3} \cos^2 \alpha - 2 \frac{d^2 \alpha}{dZ^2} \frac{d\alpha}{dZ} \sin 2\alpha - \left( \frac{d\alpha}{dZ} \right)^3 (1,5 \cos^2 \alpha - 1) \right] - \quad (3)$$

$$- \left[ 0,5 A_y \left( \frac{d\alpha}{dZ} \right)_{Z=0}^2 + N_{02} \right] \frac{d\alpha}{dZ} + \frac{1}{\cos \alpha} T_y(Z) = 0,$$

направленными по нормальям к осям нитей и равномерно распределенными. В краевых сечениях нитей будут действовать внутренние изгибающие моменты  $M_{01}, M_{02}$  и внутренние продольные силы  $N_{01}, N_{02}$ .

Введем системы координат  $YO_1X$  и  $VO_2Z$ , начала которых  $O_1$  и  $O_2$  совпадают с точками пересечения осевых линий нитей с плоскостями, проходящими через центры сечений соответственно крайней левой уточной (рис. 2-а) и крайней левой основной (рис. 2-б) нитей.

Наряду с введенными выше обозначениями на рисунках показаны:  $s_1, s_2, s_3, s_4, l_1, l_2, l_3, l_4$  – координаты, определяющие действие распределенных нагрузок на отрезках нитей;  $L_y, L_o, h^y, h^o$  – геометрические плотности и высоты волн изгиба уточной и основной нитей.

Поперечные сечения нитей принимались эллиптическими. Размеры поперечных сечений нитей по горизонтали обозначены на рис. 2-а, б как  $d_o \eta_{ог}, d_y \eta_{уг}$  ( $\eta_{ог}, \eta_{уг}$  – коэффициенты смятия нитей основы и утка по горизонтали).

Вывод математической модели строения ткани полотняного переплетения на основе представленных расчетных моделей ее строения (рис. 2-а, б) и положений нелинейной механики гибких нитей подробно приводится в [17, с. 219...241]. Поэтому приведем данную математическую модель без вывода:

$$\frac{dV}{dZ} = \operatorname{tg}\alpha, \quad (4)$$

$$q_0 d_y = q_y d_o, \quad (5)$$

$$y|_{x=L_y} + V|_{Z=L_0} = d_0 \eta_{об} + d_y \eta_{ув}, \quad (6)$$

где функции внешних нагрузок  $T_o(x)$  и  $T_y(Z)$  определяются по выражениям:

$$T_o(x) = q_o [1 - H(x - x_1) - H(x - x_2) + H(x - x_3) + H(x - x_4)], \quad (7)$$

$$T_y(Z) = q_y [1 - H(Z - Z_1) - H(Z - Z_2) + H(Z - Z_3) + H(Z - Z_4)], \quad (8)$$

$H(x - x_j), H(Z - Z_j)$  – функции Хевисайда, характеризующие действие распределенных нагрузок на отрезки нитей;  $x_i (i = 1, 2, \dots, 4)$  и  $Z_i (i = 1, 2, \dots, 4)$  координаты по осям  $x$  и  $Z$ , определяющие действие распределенных нагрузок (рис. 2);  $A_o, A_y, d_o, d_y, \eta_{об}, \eta_{ув}$  – соответственно изгибные жесткости, диаметры, коэффициенты вертикального смятия основной и уточной нитей;  $\alpha, \phi$  – текущее значение углов поворота плоскостей сечений уточной и основной нитей;  $V, Z, y, x$  – координаты произвольной точки осевой линии уточной и основной нити в осях  $VO_2Z$  и  $yO_1x$ ;  $N_{O1}, N_{O2}$  – натяжения в точках  $O_1$  и  $O_2$  отрезков основной и уточной нитей (для ткани, снятой со станка,  $N_{O1} = 0, N_{O2} = 0$ );  $\cos \phi \neq 0, \cos \alpha \neq 0$ .

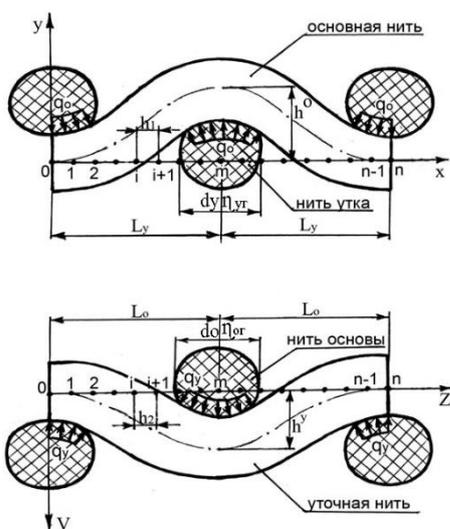


Рис. 3

В системе (1)...(6) первые два уравнения описывают равновесие отрезка основы в элементе ткани под действием внешних и внутренних сил, два следующих – равновесие отрезка уточины, предпоследнее уравнение отражает равенство усилий в зоне контакта со стороны основы на уток и со стороны утка на основу (при его получении принято допущение о том, что длина дуги в зоне контакта между нитями в расчетной модели для отрезка уточной нити равна диаметру нити основы, а длина дуги в зоне контакта между нитями в расчетной модели для отрезка основы равна диаметру уточной нити), последнее уравнение – геометрическое соотношение Н.Г. Новикова для однослойных тканей полотняного переплетения – сумма высот волн изгиба нитей основы и утка равна сумме их диаметров с учетом вертикального смятия нитей.

Система (1)...(6) относительно шести неизвестных  $\phi, \alpha, y, V, q_o, q_y$  получена для наиболее общего случая, когда на перемещения точек осевой линии нитей не накладывалось каких-либо ограничений, поэтому она может быть использована для исследования строения любых однослойных тканей полотняного переплетения, в том числе и особо уплотненных как по основе, так и по утку. Аналитическое решение представленной нелинейной системы уравнений, включающей дифференциальные уравнения и геометрическое соотношение, в общем виде получить практически невозможно. Из-за структуры системы ее решение методами прямого интегрирования затруднено. Наиболее эффективным методом

ее решения, по нашему мнению, является метод конечных разностей. Для получения конечно-разностного аналога системы (1)...(6) введем конечно-разностную сетку на отрезках  $2L_y$  и  $2L_0$ , разделив эти отрезки на  $n$  равных частей (рис. 3-а, б).

Аппроксимируя первую, вторую и третью производные системы (10...96) цен-

тральными разностями [18] и выполнив необходимые преобразования (получение конечно-разностного аналога системы (1...6) приводится в [17, С. 241...247], и ввиду ограниченности объема данной статьи не может быть здесь представлено), получим:

$$A_0 \left[ \frac{(\phi_{i+2} - 2\phi_{i+1} + 2\phi_{i-1} - \phi_{i-2})}{2h_1^3} \cos^2 \phi_i - \right. \\ \left. - \frac{(\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1})(\phi_{i+1} - \phi_{i-1})}{h_1^3} \sin 2\phi_i - \frac{(\phi_{i+1} - \phi_{i-1})^3}{8h_1^3} (1,5 \cos^2 \phi_i - 1) \right] - \\ - \left[ 0,5A_0 \frac{(\phi_{i+1} - \phi_{i-1})^2}{4h_1^2} \Big|_{x=0} + N_{O_1} \right] \left[ \frac{(\phi_{i+1} - \phi_{i-1})}{2h_1} + \frac{1}{\cos \phi_i} T_0(x) = 0, \right. \\ \left. \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h_1} = \operatorname{tg} \phi_i, \right. \quad (9)$$

$$A_y \left[ \frac{(\alpha_{i+2} - 2\alpha_{i+1} + 2\alpha_{i-1} - \alpha_{i-2})}{2h_2^3} \cos^2 \alpha_i - \right. \\ \left. - \frac{(\alpha_{i+1} - 2\alpha_i + \alpha_{i-1})(\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1})}{h_2^3} \sin 2\alpha_i - \frac{(\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1})^3}{8h_2^3} (1,5 \cos^2 \alpha_i - 1) \right] - \\ - \left[ 0,5A_y \frac{(\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1})^2}{4h_2^2} \Big|_{z=0} + N_{O_2} \right] \left[ \frac{(\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1})}{2h_2} + \frac{1}{\cos \alpha_i} T_y(z) = 0, \right. \\ \left. \frac{V_{i+1} - V_{i-1}}{2h_2} = \operatorname{tg} \alpha_i, \quad q_0 d_y = q_y d_0, \right.$$

$$2h_1 \sum_{j=1,3,5\dots}^{j=m-1} \operatorname{tg} \phi_j + 2h_2 \sum_{j=1,3,5\dots}^{j=m-1} \operatorname{tg} \alpha_j = d_0 \eta_{об} + d_y \eta_{yb},$$

где  $h_1 = \frac{2L_y}{n}$  – шаг конечно-разностной сетки для отрезка основы элемента ткани;  
 $h_2 = \frac{2L_0}{n}$  – шаг конечно-разностной сетки для отрезка утка элемента ткани.

Для решения системы (9) имеем следующие граничные условия:

- для отрезка основы элемента ткани

$$\phi_0 = 0; \phi_{-1} = -\phi_1; \phi_n = 0; \phi_{n+1} = -\phi_{n-1}; \\ y_0 = x_0 = 0; x_n = 2L_y; y_n = 0; y_{n+1} = y_{n-1};$$

- для отрезка утка элемента ткани

$$\alpha_0 = 0; \alpha_{-1} = -\alpha_1; \alpha_n = 0; \alpha_{n+1} = -\alpha_{n-1}; \\ V_0 = Z_0 = 0; Z_n = 2L_0; V_n = 0; V_{n+1} = V_{n-1}$$

Полученный конечно-разностный аналог (9) математической модели строения ткани (1)...(6) представляет собой систему нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений, которые решаются стандартными численными методами с использованием компьютерных технологий. На ее основе могут быть определены такие параметры строения ткани, как длины, высоты волн изгиба нитей основы и утка в элементе ткани и их отношение (порядок фазы строения ткани), формы осевых линий нитей, силы давления между нитями и их смятие, уработки нитей, толщина и наполнение ткани волокнистым материалом и т. д. Исходными данными для их расчета являются технологические плотности ткани по основе и утку, жесткостные характеристики нитей и ряд других показателей.

## ВЫВОДЫ

1. Проанализированы достоинства и недостатки полимерных композиционных материалов, армированных тканями.

2. Исследована структура ткани полотняного переплетения, применяемой для армирования полимерных композиционных материалов, получены расчетная, математическая модели ее строения и конечно-разностный аналог для расчета параметров ткани.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Г.В. Создание и технология получения технических тканей для производства композиционных материалов: Дис...докт. техн. наук. – М.: МТИ им. А.Н. Косыгина, – М., 1990.
2. Степанов Г.В., Степанов С.Г. Теория строения ткани. – Иваново: ИГТА, 2004.
3. Чистова И.Н., Степанов Г.В. Техническая ткань для производства композиционных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1996, № 3. С. 108...109.
4. Степанов О.С., Романычев Н.К., Моторин А.В. Ткань из высокомолекулярных технических нитей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009, № 3. С. 41...45.
5. Евсюкова Е.В. Разработка структуры и исследование свойств углеродных тканей для композитов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, № 2. С. 74...77.
6. Гречухин А.П. Математическая модель строения ткани из углеродных нитей // Изв. вузов. Техно-

логия текстильной промышленности. – 2015, № 5. С.94...100.

7. Кащеева М.М., Николаев С.Д. Анализ свойств и строения углеродных тканей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009, № 4С. С. 75...77.

8. Николаев С.Д., Евсюкова Е.В. Метод проектирования углеродных тканей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1995, № 3. С.27...30.

9. Юхин С.С., Назарова М.В., Бойко С.Ю., Романов В.Ю. Математическое моделирование процесса получения тканых материалов, используемых для изготовления композитов. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 3. С.136...140.

10. Гречухин А.П., Зайцев Д.В., Ушаков С.Н., Рудовский П.Н. Методика построения трехмерной модели ткани из углеродных нитей// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 3. С.140...144.

11. Донецкий К.П., Хрульков А.В. Применение натуральных волокон при изготовлении полимерных композиционных материалов //Труды ВИАМ. – 2015, № 2. С. 9.

12. Баранов А.В., Ларин И.Ю., Морыганов А.П. Прогнозирование возможности получения армированных композитов на основе элементаризованного льноволокна// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 2. С. 113...117.

13. Карева Т.Ю., Барабанищкова И.С., Смирнова Т.В. Однослойные тканые структуры ортогонального и неортогонального строения для производства композиционных материалов// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 5. С. 52...56.

14. Степанов С.Г., Джаннаизова В.М., Мырхалыков Ж.У., Кенжибаева Г.С., Туракулов Б.С. Математическая модель строения технических тканей для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 4. С. 79...83.

15. Степанов С.Г., Джаннаизова В.М., Мырхалыков Ж.У., Кенжибаева Г.С., Туракулов Б.С. Расчет параметров строения технической ткани для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 6. С. 113...118.

16. Композиционные материалы: Справочник / под ред. В.В. Васильева и Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990.

17. Степанов С.Г. Развитие теории формирования и строения ткани на основе нелинейной механики гибких нитей: Дис. ... докт. техн. наук. – Иваново, 2007.

18. Годунов С.К., Рябенкий В.С. Разностные схемы. – М.: Наука, 1973.

## REFERENCES

1. Stepanov G.V. Creation and technology for obtaining technical fabrics for the production of composite materials: Dis. ... Doc. tech. Sciences. – M.: MTI im. A.N. Kosygin, - M., 1990.
2. Stepanov G.V., Stepanov S.G. The theory of tissue structure. - Ivanovo: IGTA, 2004.
3. Chistova I.N., Stepanov G.V. Technical fabric for the production of composite materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 1996, No. 3. S. 108 ... 109.
4. Stepanov O.S., Romanychev N.K., Motorin A.V. Fabric from high-modulus technical threads // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2009, No. 3. S. 41 ... 45.
5. Evsyukova E.V. Development of the structure and study of the properties of carbon fabrics for composites // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2013, No. 2. S. 74 ... 77.
6. Grechukhin A.P. Mathematical model of the structure of a fabric made of carbon filaments // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2015, No.5. P.94...100.
7. Kashcheeva M.M., Nikolaev S.D. Analysis of the properties and structure of carbon tissues // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2009, No. 4C. pp. 75...77.
8. Nikolaev S.D., Evsyukova E.V. Method for designing carbon fabrics // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 1995, No. 3. S.27 ... 30.
9. Yukhin S.S., Nazarova M.V., Boyko S.Yu., Romanov V.Yu. Mathematical modeling of the process of obtaining woven materials used for the manufacture of composites. // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2017, No. 3. P. 136 ... 140.
10. Grechukhin A.P., Zaitsev D.V., Ushakov S.N., Rudovsky P.N. A technique for constructing a three-dimensional model of fabric from carbon filaments// *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2017, No. 3. P.140...144.
11. Donetsk K.P., Khrulkov A.V. The use of natural fibers in the manufacture of polymer composite materials // *Proceedings of VIAM.* - 2015, No. 2. P. 9.
12. Baranov A.V., Larin I.Yu., Moryganov A.P. Predicting the Possibility of Obtaining Reinforced Composites Based on Elementarized Flax Fiber // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2018, No. 2. P.113...117.
13. Kareva T.Yu., Barabanshchikova I.S., Smirnova T.V. Single-layer woven structures of orthogonal and non-orthogonal structure for the production of composite materials// *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2020, No. 5. S. 52...56.
14. Stepanov S.G., Dzhanpaizova V.M., Myrkhalykov Zh.U., Kenzhibaeva G.S., Turakulov B.S. Mathematical model of the structure of technical fabrics for the production of thermoplastic composite materials using reduced technology // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2020, No. 4. S. 79 ... 83.
15. Stepanov S.G., Dzhanpaizova V.M., Myrkhalykov Zh.U., Kenzhibaeva G.S., Turakulov B.S. Calculation of the structure parameters of technical fabric for the production of thermoplastic composite materials using reduced technology // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2020, No. 6. P. 113...118.
16. Composite materials: Handbook / ed. V.V. Vasilyev and Yu.M. Tarnopolsky. - M.: Mashinostroenie, 1990.
17. Stepanov S.G. Development of the theory of formation and structure of tissue based on the nonlinear mechanics of flexible threads: Dis. ... doc. tech. Sciences. - Ivanovo, 2007.
18. Godunov S.K., Ryaben'kiy V.S. Difference schemes. – M.: Nauka, 1973.

Поступила 14.01.21.

---