

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ
И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОСЛОЙНОЙ ТКАНИ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЕЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ
С УЧЕТОМ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НИТЕЙ**

**THE METHOD OF DETERMINING SPATIAL COORDINATES AND
GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF A SINGLE-LAYER FABRIC FOR
THE CONSTRUCTION OF ITS COMPUTER MODEL TAKING INTO ACCOUNT
THE RIGIDITY CHARACTERISTICS OF THE THREADS USED**

*Т.Ю. КАРЕВА¹, Л.В. КОЖЕВНИКОВА¹, С.О. КОЖЕВНИКОВ², Т.В. СМЕРНОВА¹,
И.С. БАРАБАНЩИКОВА¹*

*T.YU. KAREVA¹, L.V. KOZHEVNIKOVA¹, S.O. KOZHEVNIKOV², T.V. SMIRNOVA¹,
I.S. BARABANSHCHIKOVA¹*

¹Ивановский государственный политехнический университет,

²Ивановский государственный энергетический университет им. Ленина)

(¹Ivanovo State Polytechnic University,

²Ivanovo State Power Engineering University)

E-mail: ktju@bk.ru

Проведен анализ существующих методик компьютерного моделирования переплетения ткани и приведена методика определения пространственных координат точек контакта нитей и высот волн их изгиба для построения компьютерной модели однослойной ткани с учетом жесткостных характеристик используемых нитей. При компьютерном моделировании ткани для отражения основополагающих черт моделируемого объекта необходимо не просто выполнить анализ внешнего вида ткани, а получить визуализацию взаимного расположения нитей в ячейке переплетения с учетом параметров строения ткани и ее сырьевого состава, что может быть обеспечено только с учетом жесткостных характеристик используемых нитей и параметров переплетения. Для построения модели однослойной ткани главного класса переплетений, выполненной в виртуальной среде, приведены системы математических выражений, обеспечивающие определение пространственных координат точек контакта нитей в ткани и их высот волн изгиба, проведена унификация представления исходных данных, предложены формулы для определения высот волн изгиба нитей и алгоритм получения систем математических выражений в случае построения модели однослойной ткани различного переплетения.

The article presents an analysis of existing methods for computer modeling of fabric weave and provides a method for determining the spatial coordinates of the thread contact points and the heights of their bending waves to build a computer model of a single-layer fabric taking into account the rigidity characteristics of the threads used. In computer modeling of fabric, in order to reflect the fundamental features of the simulated object, it is necessary to perform not just an analysis of the appearance of the fabric, but to visualize the relative position of the threads in the weave cell, taking into account the parameters of the structure of the fabric and its raw material composition, which can be provided only taking into account the stiffness characteristics of the threads used and the parameters of the weave. To build a model of a single-layer fabric of the main class of weaves, made in a virtual environment, the systems of mathematical expressions are provided that ensure the determination of the spatial coordinates of the thread contact points in the fabric and their bending wave heights, the presentation of the initial data is unified, formulas are proposed for determining the heights of the bending waves of the threads and an algorithm for obtaining systems of mathematical expressions in the case of building a model of a single-layer fabric of different weaves.

Ключевые слова: компьютерная модель ткани, пространственные координаты точек контакта нитей, параметры строения однослойной ткани, жесткостные характеристики нитей.

Keywords: computer model of fabric, spatial coordinates of thread contact points, parameters of the structure of single-layer fabric, stiffness characteristics of threads.

Стремительное развитие информационных технологий предоставляет возможность решения сложных многоуровневых задач. Если ранее учеными текстильщиками вопросы в области теории строения и проектирования тканей решались в основном в плоскости, то сейчас уровень развития информационных технологий позволяет решать сложные пространственные задачи с использованием систем автоматизированного проектирования и твердотельного моделирования. В теории строения тканей это связано с прогнозированием взаимного расположения нитей в пространстве в зависимости от их переплетения, построением компьютерной модели ткани, что нашло отражение в работах авторов [1...4].

В [1] разработана методика построения трехмерной модели строения ткани с различными геометрическими параметрами каждой ячейки переплетения, апробированная на примере построения трехмерной модели ткани из углеродных нитей полотняного переплетения. Однако в данной ра-

боте имеется ряд недостатков: не учитываются жесткостные характеристики нитей и силы нормального давления нитей друг на друга в точках контакта, которые определяют величину взаимного изгиба нитей в ткани и ее строение.

Материал статьи [2] посвящен разработке алгоритма создания в программной среде текстильного материала полотняного переплетения. Данная разработка позволяет сформировать виртуальную модель тканой структуры с использованием геометрических характеристик ткани, но не учитывает жесткостных параметров используемых нитей.

Модели строения ткани, приведенные в [3], отражают независимость описания каждой нити относительно соседних в структуре ткани и могут использоваться лишь для визуализации на этапе подбора переплетений без учета заправочных параметров.

В работе [4] приведен алгоритм синтеза 3D-модели тканой армирующей структуры полимерного композитного материала и решена задача по созданию и реализации

алгоритмического программного комплекса на основе методологии численного объектно-ориентированного моделирования. Приведенный алгоритм позволяет сформировать блок глобальных управляющих переменных с возможностью системной интеграции внешних приложений и организовать итерационные взаимосвязи действующих твердотельных 3D-моделей с вычислительными системами. Данная методика позволяет выполнить геометрическую визуализацию строения тканой структуры, но не учитывает жесткостных характеристик нитей.

Все эти подходы хороши с позиции анализа внешнего вида ткани, получения модели как таковой с целью визуализации взаимного расположения нитей в структуре, однако не отражают зависимость структуры ткани от заправочных параметров, жесткостных характеристик нитей и вида переплетения. При использовании в системах основы и утка нитей одного сырьевого состава и близких линейных плотностей, несомненно, предложенные модели будут отражать взаиморасположение нитей рассматриваемых переплетений, так как в этом случае взаимный изгиб нитей в ткани будет примерно одинаковым в пределах пятипроцентной ошибки. Однако, как только линейные плотности нитей будут отличаться значительно, даже при одинаковом сырьевом составе изгиб нитей в ткани по системам будет различный, не говоря уже о случае использования в системах нитей с существенно разными жесткостными показателями. Как известно, модель должна сохранять существенные черты моделируемого объекта реального мира и описывать основные его свойства, параметры, внутренние и внешние связи с заданной разработчиком точностью.

В нашем случае компьютерное моделирование ткани должно обеспечивать ее визуализацию исходя из заправочных параметров, жесткостных характеристик нитей, анализа переплетения, с учетом решения вопроса перехода ткани в зависимости

от указанных параметров из условно плоской структуры (однослойной) в многослойную. Условно плоская потому, что в однослойной ткани нити располагаются относительно друг друга как минимум на двух разных уровнях, т. е. не в одной плоскости. Что касается вафельного переплетения, то в этой однослойной ткани нити расположены таким образом, что на уровне взаимодействующих нитей это переплетение можно назвать многослойным. При этом с увеличением плотности расположения нитей в ткани объемность вафельного переплетения увеличивается и наоборот. Таким образом, модель ткани должна учитывать, наряду с линейными плотностями нитей, их видом сечения, и плотности расположения в полотне, жесткостные характеристики и особенности переплетения. Так, в современных зарубежных программных комплексах по проектированию и моделированию тканей, например WiseTex, используется метод расчета параметров одно- и многослойных тканей с учетом жесткостных характеристик используемых нитей, вида переплетения, заправочных параметров [5, 6].

Для реального представления ткани заданного переплетения компьютерная модель должна строиться по рассчитанным координатам с учетом жесткости нитей на изгиб и вида перекрытия в каждой конкретной точке пространства. Примем во внимание результаты исследований в области проектирования тканей отечественных и зарубежных ученых [1...7] и рассмотрим особенности определения точек контакта нитей в ткани и расчета параметров ее строения в пространстве. Начнем с полотняного переплетения как самого маломасштабного с позиции используемых уравнений и основы для понимания приводимой методики. Точками 1, 2, 3 и 4 обозначим точки контакта нитей основы и утка. Начало декартовой системы координат в пространстве разместим в точке 1 (рис. 1).

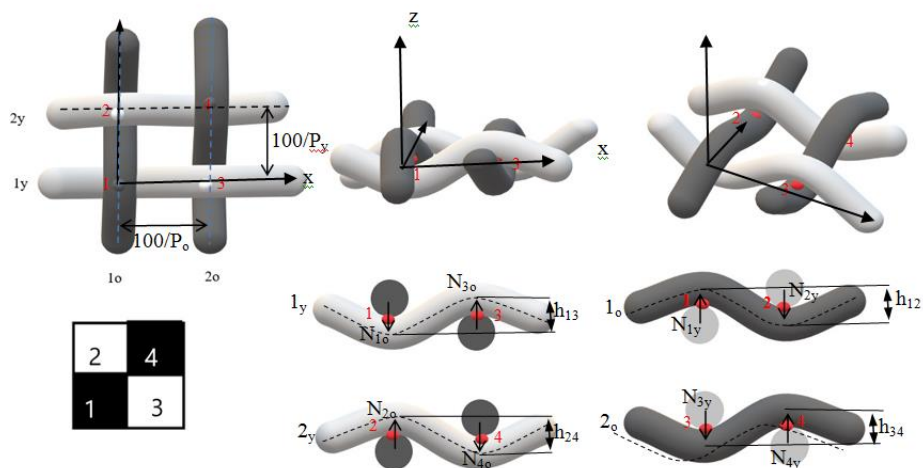


Рис. 1

Примем некоторые начальные условия и допущения:

- расстояние между центрами одноименных нитей в месте их пересечения другой системой (геометрическая плотность) для нитей основы составляет $100/P_o$, для нитей утка – $100/P_y$, где P_o и P_y – плотности расположения нитей по основе и утку соответственно, нит./дм;

- осевая линия изгиба нити расположена в плоскости (нити основы в плоскости zy или ей параллельной, нити утка в плоскости zx или ей параллельной);

- координату точки взаимодействия нитей основы и утка определяем: вдоль нити основы (в плоскости zy или ей параллельной) в зависимости от координаты точки взаимодействия этой нити с предыдущей нитью утка (т. е. рассматриваем перекрытия по рисунку переплетения снизу вверх), вдоль нити утка (в направлении плоскости zx или ей параллельной) в зависимости от координаты точки взаимодействия этой нити с предыдущей нитью основы (т. е. рассматриваем перекрытия по рисунку переплетения слева направо).

С учетом принятых условий координаты точек контакта в декартовых осях (x, y, z) для плотняного переплетения будут иметь следующий вид:

- точка 1 ($0, 0, h_1$);
- точка 2 ($0, 100/P_y, h_2$);
- точка 3 ($100/P_o, 0, h_3$);
- точка 4 ($100/P_o, 100/P_y, h_4$).

Координаты точек в направлении оси z согласно рис. 1 можно определить следующим образом:

в плоскости zy (вдоль основы):

$$\begin{aligned} h_1 &= 0, \\ h_2 &= h_1 + d_o/2 - h_{12} + d_o/2 = h_1 + d_o - h_{12}, \\ h_3 &= h_4 + d_o/2 - h_{43} + d_o/2 = h_4 + d_o - h_{43}, \\ h_4 &= h_3 - d_o/2 - h_{34} + d_o/2 = h_3 - d_o + h_{34}h_{24}; \end{aligned} \quad (1)$$

в плоскости zx (вдоль утка):

$$\begin{aligned} h_1 &= 0, \\ h_2 &= h_4 - d_y/2 + h_{42} - d_y/2 = h_4 - d_y + h_{42}, \\ h_3 &= h_1 - d_y/2 + h_{13} - d_y/2 = h_1 - d_y + h_{13}, \\ h_4 &= h_2 + d_y/2 - h_{24} + d_y/2 = h_2 + d_y - h_{24}. \end{aligned} \quad (2)$$

Плотняное переплетение единственное из всех возможных ткацких переплетений, в котором координаты последней и первой точек взаимодействия всех рассматриваемых нитей в плоскостях zy и zx зависят непосредственно друг от друга, поэтому решение этой системы будет немного отличаться от решения системы для любого другого переплетения главного класса. Исключив подобные выражения и выразив координаты точек через высоты волн изгиба нитей основы и утка в точке 1, будем иметь:

$$\begin{aligned} h_1 &= 0, \\ h_2 &= d_o - h_{12}, \\ h_3 &= -d_y + h_{13}, \\ h_4 &= h_3 - d_o + h_{34}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для определения высот волн изгиба нитей основы и утка можно использовать линейную и нелинейную теории изгиба. Более точное представление линии изгиба оси нити дает нелинейная теория изгиба, линейная же теория предполагает более простое решение задачи. Вначале рассмотрим применение линейной теории изгиба при определении координат точек взаимодействия нитей в ткани для построения ее компьютерной модели. Согласно [8] в ткани полотняного переплетения, снятой со станка, высоты волн изгиба нити основы h_o и нити утка h_v могут быть определены следующим образом:

$$\begin{aligned} h_o &= N_y(100/P_y)^3/(12 \cdot E_o \cdot J_o), \\ h_v &= N_o(100/P_o)^3/(12 \cdot E_y \cdot J_y), \end{aligned} \quad (4)$$

где N_o , N_y – силы нормального давления нитей основы и утка соответственно, Н; E_o , E_y – модули упругости нитей основы и утка соответственно, МПА; J_o , J_y – моменты инерции сечения нити основы и утка соответственно, мм⁴.

Как известно, произведение модуля упругости и момента инерции сечения определяет изгибную жесткость нити: основы – $H_o = E_o \cdot J_o$ (Н·мм²), утка – $H_y = E_y \cdot J_y$ (Н·мм²). Использование в (4) вышеуказанного произведения оправдано в случае прогнозирования строения тканей, формируемых из нитей сплошного сечения, например химических моноплетей, металлических проволок и др. В случае прогнозирования строения тканей из пряжи (нитей) в силу возможной разной величины крутки, различного качества и количества волокон в поперечном сечении пряжи одного и того же сырьевого состава и линейной плотности может иметь существенно разные значения изгибной жесткости и использование в (4) жесткости нитей как произведения модуля упругости и момента инерции сечения может привести к значительным погрешностям при проектировании строения ткани. В связи с этим при прогнозировании параметров строения ткани, создании ее пространственной модели целесообразно вместо произведения модуля упругости и момента инерции сечения использовать экспериментально

определенные значения изгибной жесткости нитей [9, 10].

Принимая во внимание вышеуказанное, в нижеследующих теоретических выражениях под жесткостью нитей на изгиб имеем в виду ее экспериментально определенные значения: для нитей основы H_o (Н·мм²), для нитей утка H_y (Н·мм²).

С учетом основного правила Н.Г. Навикова:

$$N_y(100/P_y)^3/(12 \cdot H_o) + N_o(100/P_o)^3/(12 \cdot H_y) = d_o + d_y. \quad (5)$$

Тогда в системе (3) (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} h_1 &= 0, \\ h_2 &= d_o - h_{12} = d_o - N_{1y}(100/P_y)^3/(12 \cdot H_o), \\ h_3 &= -d_y + h_{13} = -d_y + N_{1o}(100/P_o)^3/(12 \cdot H_y), \\ h_4 &= h_3 - d_o + h_{34} = -d_y + N_{1o}(100/P_o)^3/(12 \cdot H_y) - \\ &\quad - d_o + N_{3y}(100/P_y)^3/(12 \cdot H_o). \end{aligned} \quad (6)$$

Согласно теории строения тканей главного класса переплетений любая нить основы (утка) имеет одинаковый характер переплетения с противоположной системой, только смещена относительно других нитей своей системы в соответствии с заданным сдвигом. При формировании ткани каждая из нитей основы, идущая с ткацкого навоя, в соответствии с работой основного регулятора подается в зону формирования на определенную равную величину, одновременно в каждый зев подается одинаковая длина нити утка, что определяет равную длину заработанных нитей в раппорте среди нитей основы и среди нитей утка. Все вышеуказанное при формировании тканей переплетением главного класса при условии использования нитей внутри системы одной линейной плотности и одного сырьевого состава, равенства сил действия и противодействия нитей друг на друга предопределяет равную величину высоты волны изгиба нитей системы, следовательно, и силу, от которой зависит величина изгиба.

Пространственная ячейка раппорта полотняного переплетения находится в состоянии равновесия, т. е. $N_{1y} = N_{2y}$, $N_{3y} = N_{4y}$, $N_{1o} = N_{3o}$, $N_{2o} = N_{4o}$. Одновременно в точках контакта нитей в силу действия

третьего закона Ньютона имеем следующие равенства: $N_{1o}=N_{1y}$, $N_{2o}=N_{2y}$, $N_{3o}=N_{3y}$, $N_{4o}=N_{4y}$. С учетом вышеуказанного, принимая во внимание равновесие пространственной ячейки, систему (3) запишем в виде

$$\begin{aligned} h_1 &= 0, \\ h_2 &= d_o - h_{12} = d_o - N_{1o}(100/P_y)^3/(12 \cdot H_o), \quad (7) \\ h_3 &= -d_y + h_{13} = -d_y + N_{1o}(100/P_o)^3/(12 \cdot H_y), \\ h_4 &= h_3 - d_o + h_{34} = -d_y + N_{1o}(100/P_o)^3/(12 \cdot H_y) - \\ &\quad - d_o + N_{1o}(100/P_y)^3/(12 \cdot H_o). \end{aligned}$$

Сила нормального давления N_{1o} из выражения (7) с учетом равновесия пространственной ячейки раппорта полотняного переплетения может быть определена следующим образом:

$$N_{1o} = (d_o + d_y) / ((100/P_y)^3/(12 \cdot H_o) + (100/P_o)^3/(12 \cdot H_y)). \quad (8)$$

Таким образом, система (4) с учетом выражения (5) позволит определить координаты точек контакта нитей основы и утка в пространстве в случае круглого сечения нитей основы и утка и на основании этих данных с учетом рассчитанных величин высоты волн изгиба нитей в ткани по заданным линейным плотностям нитей основы T_o и утка T_y , коэффициентам рода волокна C_o , C_y , смятия нитей в ткани τ_o , τ_y и плотностям расположения нитей в ткани P_o , P_y построить компьютерную модель ткани с учетом ее переплетения и жесткостных характеристик нитей. В случае эллипсообразного вида сечения нитей основы и утка в ткани система (7) и выражение (8) примут следующий вид:

$$\begin{aligned} h_2 &= d_{ов} - h_{12} = d_{ов} - N_{1o}(100/P_y)^3/(12 \cdot H_o), \\ h_3 &= -d_{ув} + h_{13} = -d_{ув} + N_{1o}(100/P_o)^3/(12 \cdot H_y), \quad (9) \\ h_4 &= h_3 - d_{ов} + h_{34} = -d_{ув} + N_{1o}(100/P_o)^3/(12 \cdot H_y) - \\ &\quad - d_{ов} + N_{1o}(100/P_y)^3/(12 \cdot H_o), \\ N_{1o} &= (d_{ов} + d_{ув}) / ((100/P_y)^3/(12 \cdot H_o) + \\ &\quad + (100/P_o)^3/(12 \cdot H_y)). \end{aligned}$$

Проведены экспериментальные исследования образцов хлопчатобумажных тканей (рис. 2), заправочные параметры которых представлены в табл. 1 и 2.

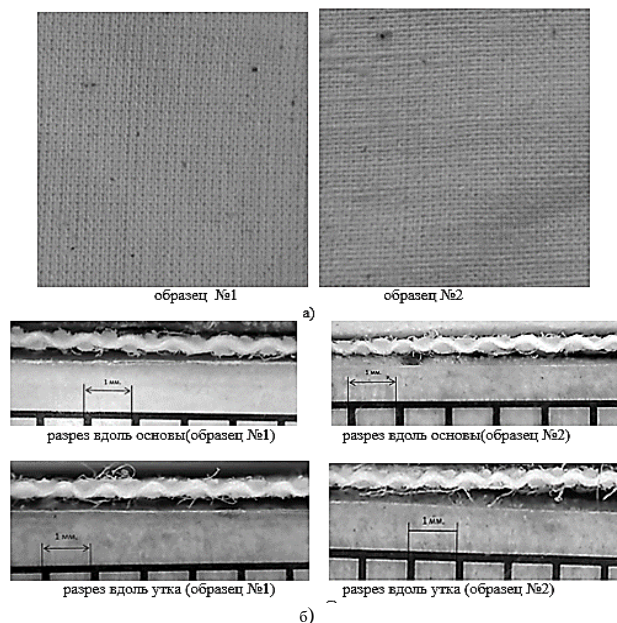


Рис. 2

По методике, описанной в [9], определены изгибные жесткости нитей основы и утка (см. табл. 1 и 2). В утке обеих тканей используется хлопчатобумажная пряжа линейных плотностей 25 и 26 текс. Следовательно бы ожидать, что значения изгибных жесткостей уточных нитей обоих образцов будут близкими, что определялось бы произведением модуля упругости хлопчатобумажной пряжи и момента инерции сечения, однако, как видно из табл. 1 и 2, эти значения отличаются и существенно. Это может быть связано в том числе с тем, что, как видно из рис. 2, а, структура уточной пряжи образца 2 неравномерная, в ней присутствует большое количество непрорядов, что значительно снижает ее прочностные и жесткостные характеристики.

В табл. 1 и 2 представлены результаты расчета данных для построения компьютерной модели образцов №1 и №2, а также средние значения высот волн изгиба нитей основы и утка, определенные по фотографиям разрезов вдоль основы и утка (рис. 2, б).

В табл. 1 и 2 приведены результаты теоретического расчета данных для построения компьютерной модели виртуальной ткани полотняного переплетения в случае применения в утке металлической нити из стальной проволоки. Диаметр металлической нити выбирался с условием примерного равенства его диаметру хлоп-

чатобумажной нити образцов, модуль упругости металлической нити – в соответствии с [11]. Расчеты проведены с целью анализа возможных изменений струк-

туры ткани в случае использования в основе и утке нитей с существенно разными значениями жесткости на изгиб.

Т а б л и ц а 1

Исходные данные	Линейная плотность пряжи (нити), текс		Коэффициент рода волокна		Плотность ткани, нит./дм.		Средние значения жесткости нитей на изгиб, Н·мм ² , определенные экспериментально		Коэффициенты смятия поперечного сечения нити в ткани		Средние значения высот волн изгиба нитей, определенные по фотографиям разрезов, мм		Средние экспериментально определенные значения уработок нитей у ткани, %	
	основа	уток	основа	уток	по основе	по утку	основа	уток	основа	уток	основа	уток	основа	уток
	To	Ty	Co	Cy	Ro	Ry	Ho	Hу	то	ту	h _{ожсп}	h _{уэсп}	a _о	a _у
	32	26	1,25	1,25	230	210	0,008	0,0056	0,95	0,98	0,206	0,214	8,07	9,57
Образец №1	Результаты вычислений													
	Диаметр нити, мм		Координаты точек контакта в направлении оси z, мм				Высоты волн изгиба нитей в ткани, мм.				Сила нормального давления нитей основы и утка в точке контакта, Н		Относительное отклонение расчетных значений высот волн изгиба нитей от экспериментальных, %	
	основа	уток	первая точка	вторая точка	третья точка	четвертая точка	основа	уток	основа	уток	N ₁₀		основа	уток
	d _о	d _у	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₁₂	h ₁₃ =h _у	h ₃₄ =h _о	h ₂₄ =h _у				
	0,2124	0,1975	0,0000	0,0160	0,0160	0,0000	0,1964	0,2135	0,1964	0,2135	0,1746		4,67	0,22

Исходные данные	Линейная плотность основы, текс	Диаметр нити утка, мм	Коэффициент рода волокна основы	Плотность ткани, нит./дм.		Среднее значение жесткости на изгиб нити основы, Н·мм ²	Модуль упругости уточной метал. проволоки, МПа	Жесткость на изгиб уточной метал. проволоки, Н·мм ²	Коэффициент смятия поперечного сечения нити основы						
				по основе	по утку										
	To	d _у	Co	Ro	Ry	Ho	Ey	Hу	то						
	32	0,2	1,25	230	210	0,008	180000	14,40	0,95						
Образец №1 металлическая проволока в утке	Результаты вычислений														
	Диаметр нити, мм		Координаты точек контакта в направлении оси z, мм				Высоты волн изгиба нитей в ткани, мм.				Сила нормального давления нитей основы и утка в точке контакта, Н				
	основа	уток	первая точка	вторая точка	третья точка	четвертая точка	основа	уток	основа	уток	N ₁₀				
	d _о	d _у	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₁₂	h ₁₃	h ₃₄	h ₂₄					
	0,2124	0,2000	0,0000	-0,1998	-0,1998	0,0000	0,4122	0,000174	0,4122	0,000174	0,3665				

Т а б л и ц а 2

Исходные данные	Линейная плотность пряжи (нити), текс		Коэффициент рода волокна		Плотность ткани, нит./дм.		Средние значения жесткости нитей на изгиб, Н·мм ² , определенные экспериментально		Коэффициенты смятия поперечного сечения нити в ткани		Средние значения высот волн изгиба нитей, определенные по фотографиям разрезов, мм		Средние экспериментально определенные значения уработок нитей у ткани, %	
	основа	уток	основа	уток	по основе	по утку	основа	уток	основа	уток	основа	уток	основа	уток
	To	Ty	Co	Cy	Ro	Ry	Ho	Hу	то	ту	h _{ожсп}	h _{уэсп}	a _о	a _у
	18,5	25	1,25	1,25	275	235	0,0029	0,0023	0,95	0,98	0,21	0,15	9,4	8,07
Образец №2	Результаты вычислений													
	Диаметр нити, мм		Координаты точек контакта в направлении оси z, мм				Высоты волн изгиба нитей в ткани, мм.				Сила нормального давления нитей основы и утка в точке контакта, Н		Относительное отклонение расчетных значений высот волн изгиба нитей от экспериментальных, %	
	основа	уток	первая точка	вторая точка	третья точка	четвертая точка	основа	уток	основа	уток	N ₁₀		основа	уток
	d _о	d _у	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₁₂	h ₁₃ =h _у	h ₃₄ =h _о	h ₂₄ =h _у				
	0,1615	0,1937	0,0000	-0,0373	-0,0373	0,0000	0,1988	0,1564	0,1988	0,1564	0,0898		5,35	4,27

Как видно из табл. 1 и 2, при увеличении жесткостных характеристик нитей высота волны изгиба одноименной системы нитей уменьшается, при этом разные варианты тканей имеют различные координаты точек контакта в декартовых осях (x,y,z):

образец №1: точка 1 (0;0;0); точка 2 (0; 0,476; 0,016); точка 3 (0,435; 0; 0,016); точка 4 (0,435; 0,476; 0);

виртуальная ткань с заправочными данными образца №1 с металлической нитью в утке: точка 1 (0; 0; 0); точка 2 (0; 0,476; -

0,1998); точка 3 (0,435; 0; - 0,1998); точка 4 (0,435; 0,476; 0);

образец №2: точка 1 (0; 0; 0); точка 2 (0; 0,426; -0,037); точка 3 (0,364; 0; -0,037); точка 4 (0,364; 0,426; 0);

виртуальная ткань с заправочными данными образца №2 с металлической нитью в утке: точка 1 (0; 0; 0); точка 2 (0; 0,426; - 0,2); точка 3 (0,364; 0; -0,2); точка 4 (0,364; 0,426; 0).

Согласно представленным в табл. 1 и 2 результатам вычислений можно констати-

ровать, что представленная методика определения пространственных координат и геометрических характеристик тканей главного класса может быть использована для построения компьютерной модели проектируемой ткани с учетом жесткостных характеристик используемых нитей. Экспериментальные данные хорошо согласуются с прогнозируемыми значениями, относительная погрешность определе-

ния высот волн изгиба нитей в ткани при использовании рассмотренного метода находится в пределах относительной допустимой погрешности, принятой при проведении исследований в текстильной промышленности.

Рассмотрим переплетение главного класса – саржу 1/2, представленную на рис. 3.

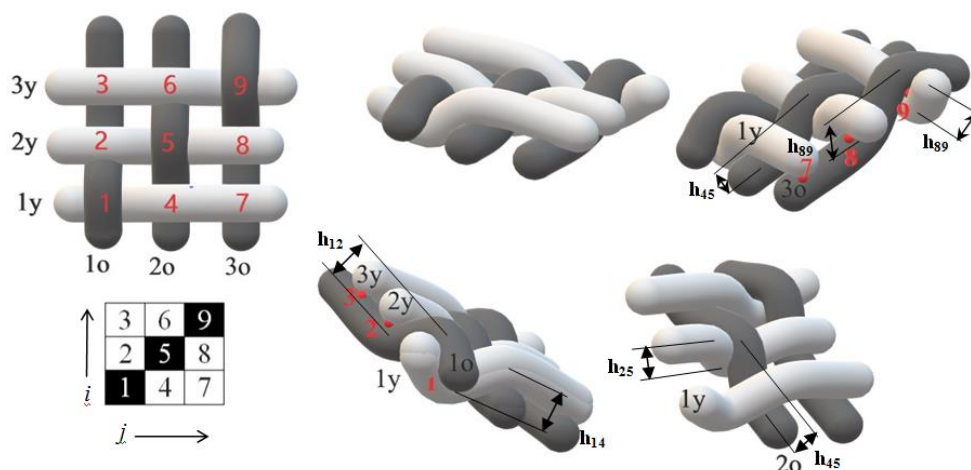


Рис. 3

Примем те же начальные условия и допущения, как при определении координат точек контакта нитей полотняного переплетения, но с небольшим уточнением, что расстояние между центрами одноименных нитей в настиле принимаем равным расстоянию в месте их пересечения другой системой.

Координаты точек контакта в декартовой пространственной системе (x, y, z) согласно рис. 3 будут иметь следующие значения:

- точка 1 (0, 0, h₁);
- точка 2 (0, 100/P_y, h₂);
- точка 3 (0, 200/P_y, h₃);
- точка 4 (100/P_o, 0, h₄);
- точка 5 (100/P_o, 100/P_y, h₅);
- точка 6 (100/P_o, 200/P_y, h₆);
- точка 7 (200/P_o, 0, h₇);
- точка 8 (200/P_o, 100/P_y, h₈);
- точка 9 (200/P_o, 200/P_y, h₉).

Координаты точек контакта в направлении оси z согласно рис. 3 можно определить следующим образом:

в плоскости zy (вдоль основы):

$$\begin{aligned}
 h_1 &= 0, \\
 h_2 &= h_1 + d_o - h_{12}, \\
 h_3 &= h_2 + h_{23}, \\
 h_4 &= h_6 + h_{64}, \\
 h_5 &= h_4 - d_o + h_{45}, \\
 h_6 &= h_5 + d_o - h_{56}, \\
 h_7 &= h_9 + d_o - h_{97}, \\
 h_8 &= h_7 + h_{78}, \\
 h_9 &= h_8 - d_o + h_{89};
 \end{aligned} \tag{10}$$

в плоскости zx (вдоль утка):

$$\begin{aligned}
 h_1 &= 0, \\
 h_2 &= h_8 + h_{82}, \\
 h_3 &= h_9 - d_y + h_{93}, \\
 h_4 &= h_1 - d_y + h_{14}, \\
 h_5 &= h_2 + d_y - h_{25}, \\
 h_6 &= h_3 + h_{36}, \\
 h_7 &= h_4 + h_{47}, \\
 h_8 &= h_5 - d_y + h_{58}, \\
 h_9 &= h_6 + d_y - h_{69}.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Примем в первом приближении, что в настиле не добавляется высоты волны изги-

ба исследуемой нити в случае возможной высокой плотности нитей противоположной системы. Тогда выражения для определения координат по оси z примут следующий вид:

в плоскости zy (вдоль основы):

$$\begin{aligned} h_1 &= 0, \\ h_2 &= h_1 + d_o - h_{12}, \\ h_3 &= h_2, \\ h_4 &= h_6, \\ h_5 &= h_4 - d_o + h_{45}, \\ h_6 &= h_5 + d_o - h_{56}, \\ h_7 &= h_9 + d_o - h_{97}, \\ h_8 &= h_7, \\ h_9 &= h_8 - d_o + h_{89}; \end{aligned} \quad (12)$$

в плоскости zx (вдоль утка):

$$\begin{aligned} h_1 &= 0, \\ h_2 &= h_8, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_3 &= h_9 - d_y + h_{93}, \\ h_4 &= h_1 - d_y + h_{14}, \\ h_5 &= h_2 + d_y - h_{25}, \\ h_6 &= h_3, \\ h_7 &= h_4, \\ h_8 &= h_5 - d_y + h_{58}, \\ h_9 &= h_6 + d_y - h_{69}. \end{aligned} \quad (13)$$

Согласно рис. 3 любая нить основы (утка) имеет одинаковый характер переплетения с противоположной системой, только смещена относительно других нитей своей системы в соответствии с заданным сдвигом, равным +1. Известно, что для переплетения саржа 1/2 [12]:

$$\begin{aligned} h_o &= 3N_y(100/P_y)^3/(7H_o), \\ h_y &= 3N_o(100/P_o)^3/(7H_y). \end{aligned} \quad (14)$$

Т а б л и ц а 3

Исходные данные	Линейная плотность пряжи (нити), текс		Коэффициент рода волокна		Плотность ткани, нит./дм.		Средние значения жесткости нитей на изгиб, Н·мм ² , определенные экспериментально		Коэффициенты смятия поперечного сечения нити в ткани			
	основа	уток	основа	уток	по основе	по утку	основа	уток	основа	уток		
	T _o	T _y	C _o	C _y	P _o	P _y	H _o	H _y	t _o	t _y		
	32	26	1,25	1,25	230	210	0,008	0,0056	0,95	0,98		
Исходные данные образца №1, переплетение саржа 1/2	Результаты вычислений											
	Диаметр нити, мм		Координаты точек контакта в направлении оси z, мм									
	основа	уток	первая точка	вторая точка	третья точка	четвертая точка	пятая точка	шестая точка	седьмая точка	восьмая точка	девятая точка	
	d _o	d _y	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h ₇	h ₈	h ₉	
	0,2124	0,1975	0,0000	0,0160	0,0160	0,0160	0,0000	0,0160	0,0160	0,0160	0,0000	
	Высоты волн изгиба нитей в ткани, мм.										Сила нормального давления, Н	
основа					уток					N _{1o}		
h ₁₂	h ₄₅	h ₅₆	h ₈₉	h ₉₇	h ₁₄	h ₂₅	h ₅₈	h ₆₉	h ₉₃	0,0339		
0,1964	0,1964	0,1964	0,1964	0,1964	0,2135	0,2135	0,2135	0,2135	0,2135	0,0339		
Исходные данные	Линейная плотность основы, текс	Диаметр нити утка, мм	Коэффициент рода волокна основы	Плотность ткани, нит./дм.		Среднее значение жесткости на изгиб нити основы, Н·мм ²	Модуль упругости уточной метал. проволоки, МПа	Жесткость на изгиб уточной метал. проволоки, Н·мм ²	Коэффициент смятия поперечного сечения нити основы			
	T _o	d _y	C _o	P _o	P _y	H _o	E _y	H _y	t _o			
	32	0,2	1,25	230	210	0,008	180000	14,40	0,95			
Исходные данные образца №1, переплетение саржа 1/2, металлическая проволока в утке	Результаты вычислений											
	Диаметр нити, мм		Координаты точек контакта в направлении оси z, мм									
	основа	уток	первая точка	вторая точка	третья точка	четвертая точка	пятая точка	шестая точка	седьмая точка	восьмая точка	девятая точка	
	d _o	d _y	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h ₇	h ₈	h ₉	
	0,2124	0,2000	0,0000	-0,1998	-0,1998	-0,1998	0,0000	-0,1998	-0,1998	-0,1998	0,0000	
	Высоты волн изгиба нитей в ткани, мм.										Сила нормального давления нитей основы и утка в точке контакта, Н	
основа					уток					N _{1o}		
h ₁₂	h ₄₅	h ₅₆	h ₈₉	h ₉₇	h ₁₄	h ₂₅	h ₅₈	h ₆₉	h ₉₃	0,071		
0,4122	0,4122	0,4122	0,4122	0,4122	0,000174	0,000174	0,000174	0,000174	0,000174	0,071		

Решая систему (7), с учетом выражения (8) и основного правила Новикова Н.Г. можно определить координаты по оси z точек контакта и высот волн изгиба по ос-

нове и утку с учетом жесткостных характеристик нитей для ткани с переплетением саржа 1/2. Проведены теоретические расчеты виртуальных тканей переплетением

саржа 1/2 с заправочными параметрами образцов №1 и №2, результаты расчетов

представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 4

Исходные данные	Линейная плотность пряжи (нити), текс		Коэффициент рода волокна		Плотность ткани, нит./дм.		Средние значения жесткости нитей на изгиб, Н·мм ² определенные экспериментально		Коэффициенты смятия поперечного сечения нити в ткани		
	основа	уток	основа	уток	по основе	по утку	основа	уток	основа	уток	
	To	Ty	Co	Cy	По	Py	Ho	Hу	то	ту	
	18,5	25	1,25	1,25	275	235	0,0029	0,0023	0,95	0,98	
Результаты вычислений											
Исходные данные образца №2, переплетение саржа 1/2	Диаметр нити, мм		Координаты точек контакта в направлении оси z, мм								
	основа	уток	первая точка	вторая точка	третья точка	четвертая точка	пятая точка	шестая точка	седьмая точка	восьмая точка	девятая точка
	d _o	d _y	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h ₇	h ₈	h ₉
	0,1615	0,1937	0,0000	-0,0373	-0,0373	-0,0373	0,0000	-0,0373	-0,0373	-0,0373	0,0000
	Высоты волн изгиба нитей в ткани, мм.										
	основа					уток					
	h ₁₂	h ₄₅	h ₅₆	h ₈₉	h ₉₇	h ₁₄	h ₂₅	h ₅₈	h ₆₉	h ₉₃	Сила нормального давления, Н N ₁₀
0,1988	0,1988	0,1988	0,1988	0,1988	0,1564	0,1564	0,1564	0,1564	0,1564	0,0175	

Исходные данные	Линейная плотность основы, текс	Диаметр нити утка, мм	Коэффициент рода волокна основы	Плотность ткани, нит./дм.		Среднее значение жесткости на изгиб нити основы, Н·мм ²	Модуль упругости уточной метал. проволоки, МПа	Жесткость на изгиб уточной метал. проволоки, Н·мм ²	Коэффициент смятия поперечного сечения нити основы		
				по основе	по утку						
	To	d _y	Co	По	Py	Ho	Ey	Hу	то		
	18,5	0,2	1,25	275	235	0,0029	180000	14,40	0,95		
Результаты вычислений											
Исходные данные образца №2, переплетение саржа 1/2, металлическая проволока в утке	Диаметр нити, мм		Координаты точек контакта в направлении оси z, мм								
	основа	уток	первая точка	вторая точка	третья точка	четвертая точка	пятая точка	шестая точка	седьмая точка	восьмая точка	девятая точка
	d _o	d _y	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h ₇	h ₈	h ₉
	0,1615	0,2000	0,0000	-0,2000	-0,2000	-0,2000	0,0000	-0,2000	-0,2000	-0,2000	0,0000
	Высоты волн изгиба нитей в ткани, мм.										
	основа					уток					
	h ₁₂	h ₄₅	h ₅₆	h ₈₉	h ₉₇	h ₁₄	h ₂₅	h ₅₈	h ₆₉	h ₉₃	Сила нормального давления нитей основы и утка в точке контакта, Н N ₁₀
0,3615	0,3615	0,3615	0,3615	0,3615	0,000045	0,000045	0,000045	0,000045	0,000045	0,031	

Как видно из результатов, приведенных в табл. 1, 2, 3 и 4, высоты волн изгиба нитей в тканях полотняного и саржевого переплетений при равных характеристиках имеют равные значения, сила нормального давления нитей в тканях саржевого переплетения меньше, чем в полотняном, что определяется наличием настила в саржевом переплетении. Как и в полотняном переплетении, при увеличении плотности ткани следует увеличение высоты волны изгиба одноименной системы нитей; при увеличении жесткостных характеристик нитей высота волны изгиба одноименной системы нитей уменьшается, координаты точек контакта также имеют разные значения.

Таким образом, для тканей главного класса геометрия строения любой нити ос-

новы и утка не только совпадает внутри системы, но и является зеркальной симметрией относительно точки контакта для пересекающихся нитей разных систем (например, в сарже 1/2 это первая нить основы и первая нить утка, вторая нить основы и вторая нить утка, третья нить основы и третья нить утка), а также зависит исключительно от заправочных параметров ткани и жесткостных характеристик нитей, т. е. нет необходимости в определении сил нормального давления в ткани, если это не является целью исследования.

На самом деле в точках 1, 5 и 9 контакта нитей основы и утка (см. рис. 3) с учетом основного правила Н.Г. Новикова и уравнения (8) сила нормального давления нитей друг на друга будет иметь вид:

$$N_1 = N_5 = N_9 = N_o = N_y = 7 \cdot (d_o + d_y) / (3 \cdot (100/P_y)^3 / H_o + 3 \cdot (100/P_o)^3 / H_y),$$

$$N_1 = N_5 = N_9 = N_o = N_y = 7 \cdot (d_{ov} + d_{yv}) / (3 \cdot (100/P_y)^3 / H_o + 3 \cdot (100/P_o)^3 / H_y). \quad (15)$$

Подставим (14) в (15), получим:

$$\begin{aligned} h_o &= 3 \cdot (100/P_y)^3 \cdot 7 \cdot (d_o + d_y) / (7 \cdot H_o) \cdot (3 \cdot (100/P_y)^3 / H_o + 3 \cdot (100/P_o)^3 / H_y), \\ h_y &= 3 \cdot (100/P_o)^3 \cdot 7 \cdot (d_o + d_y) / (7 \cdot H_y) \cdot (3 \cdot (100/P_y)^3 / H_o + 3 \cdot (100/P_o)^3 / H_y). \end{aligned} \quad (16)$$

Как видно из (16), коэффициенты при силе нормального давления (3/7 для саржи 1/2) сокращаются. То же самое получается и для полотняного переплетения (коэффициент 1/12 сокращается).

Преобразуем выражения (16), сократив подобные члены:

$$\begin{aligned} h_o &= (d_o + d_y) / (1 + ((100/P_o)^3 \cdot H_o / ((100/P_y)^3 \cdot H_y))), \quad (17) \\ h_y &= (d_o + d_y) / (1 + ((100/P_y)^3 \cdot H_y / ((100/P_o)^3 \cdot H_o))) \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} h_o &= (d_{об} + d_{уб}) / (1 + ((100/P_o)^3 \cdot H_o / ((100/P_y)^3 \cdot H_y))), \quad (18) \\ h_y &= (d_{об} + d_{уб}) / (1 + ((100/P_y)^3 \cdot H_y / ((100/P_o)^3 \cdot H_o))). \end{aligned}$$

Как видно, в выражениях (17) и (18) высота волны изгиба нитей определяется отношением изгибных жесткостей нитей, что нивелирует возможную ошибку, возникающую при экспериментальном определении изгибных жесткостей нитей основы и утка. Выражения (17) и (18) позволяют для тканей главного класса переплетений определять высоты волн изгиба нитей основы и утка по известным заправочным параметрам и жесткости используемых нитей на изгиб.

При получении компьютерной модели однослойной ткани любого переплетения главного класса необходимо представление системы уравнений типа (6), (7) в общем виде. Для этого используем кодированное представление рисунка переплетения. Любое переплетение ткани в кодированном виде, как известно, можно представить в виде матрицы из 1 и 0, где 1 соответствует основному перекрытию, 0 – уточному. Примем обозначения: i – для строчек раппорта (i изменяется от 1 до R_y), т. е. уточных нитей; j – для столбиков раппорта (j изменяется от 1 до R_o), т. е. основных нитей. Например, переплетение саржа 1/2 в матричном представлении будет иметь вид:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

и запись $A(1,2)$ будет означать обращение к элементу матрицы (перекрытию), находящемуся на пересечении 1-й строки (первой уточной нити) и 2-го столбца (второй основной нити).

Запишем в общем виде выражения для определения координат точек контакта по оси z для любого переплетения, в том числе главного класса:

в плоскости zy (вдоль основы):

если перекрытие основное после пересечки, то

$$h_i = h_{i-1} - d_o + h_{i-1,i}; \quad (20)$$

если перекрытие уточное после пересечки, то

$$h_i = h_{i-1} + d_o - h_{i-1,i}; \quad (21)$$

если перекрытие 2-е или любое следующее в настиле, то

$$h_i = h_{i-1}; \quad (22)$$

в плоскости zx (вдоль утка):

если перекрытие основное после пересечки, то

$$h_j = h_{j-1} + d_y - h_{j-i,j}; \quad (23)$$

если перекрытие уточное после пересечки, то

$$h_j = h_{j-1} - d_y + h_{j-i,j}; \quad (24)$$

если перекрытие 2-е или любое следующее в настиле, то

$$h_j = h_{j-1}. \quad (25)$$

Математические выражения (20)...(25) позволяют определять координаты точек контакта по оси z любого однослойного

переплетения по анализу расположения основных и уточных перекрытий (единицек и нулей) в раппорте переплетения ткани (матрице ее кодированного представления).

Алгоритм составления системы математических выражений будет следующим:

вдоль основы:

- если элемент матрицы $A(i,j)$ равен 1, то в случае предыдущего элемента (вдоль основы) $A(i-1,j)$, равного 0, выражение по расчету координаты будет иметь вид: $h(i,j) = h(i-1,j) - d_o + h_{i-1,i}$, в противном случае $h(i,j) = h(i-1,j)$;

- если элемент матрицы $A(i,j)$ равен 0, то в случае предыдущего элемента $A(i-1,j)$, равного 1, выражение по расчету координаты будет иметь вид: $h(i,j) = h(i-1,j) + d_o - h_{i-1,i}$, в противном случае $h(i,j) = h(i-1,j)$;

вдоль утка:

- если элемент матрицы $A(i,j)$ равен 1, то в случае предыдущего элемента (вдоль утка) $A(i,j-1)$, равного 0, выражение по расчету координаты будет иметь вид: $h(i,j) = h(i,j-1) + d_y - h_{j-1,j}$, в противном случае $h(i,j) = h(i,j-1)$;

- если $A(i,j)$ равно 0, то в случае предыдущего элемента $A(i,j-1)$, равного 1, выражение по расчету координаты будет иметь вид: $h(i,j) = h(i,j-1) - d_o + h_{j-1,j}$, в противном случае $h(i,j) = h(i,j-1)$, где $h(i,j)$ – координата точки взаимодействия i -й нити утка и j -й нити основы; $h_{i-1,i}$ – высота волны изгиба от предыдущей точки контакта до рассматриваемой вдоль основы; $h_{j-1,j}$ – высота волны изгиба от предыдущей точки контакта до рассматриваемой вдоль утка.

Таким образом, для любой точки любого переплетения однослойной ткани, т. е. для любого элемента из матрицы $A(i,j)$, пространственная координата в декартовых осях может быть записана следующим образом:

$$A(i,j) = ((j-1) \cdot 100/P_x; (i-1) \cdot 100/P_y; h(i,j)). \quad (26)$$

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика определения пространственных координат и геометрических характеристик тканей главного

класса, которая позволяет построить компьютерную модель проектируемой ткани с учетом жесткостных характеристик используемых нитей.

2. По разработанной методике определены координаты точек контакта по оси z и высоты волн изгиба нитей основы и утка для тканей полотняного переплетения и саржи $1/2$, что позволило проанализировать влияние переплетения, заправочных параметров ткани и сырьевого состава используемых нитей на параметры строения моделируемой ткани.

3. Предложены выражения для определения пространственных координат точек контакта по оси z для любого переплетения, в том числе главного класса, в общем виде, позволяющие составлять систему математических уравнений для любого переплетения однослойной ткани.

4. Для любого перекрытия переплетения однослойной ткани предложена унифицированная запись его пространственных координат в декартовых осях.

5. Получены математические выражения, позволяющие определять высоты волн изгиба нитей основы и утка в однослойной ткани, формируемой переплетением главного класса, по известным заправочным параметрам и жесткости используемых нитей на изгиб.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Колесников П.Н., Иванов А.Н. Трехмерные модели текстильных материалов полотняного переплетения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2015. № 5. С. 40...43.

3. Бенецкая В.В., Селиверстов В.Ю., Киселев А.М. и др. Моделирование структуры тканей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2013. № 3. С. 23...28.

4. Еришов С.В., Суворов И.А., Кузнецов В.Б. и др. Синтез 3d-модели тканой армирующей структуры текстильного композита средствами методологии численного объектно-ориентированного моделирования // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2021. № 1. С. 114...119.

5. Lomov S.V. WiseTex – a virtual textile compo- sites software. Advanced Weaving Technology. Y. Kyо-

sev and F. Boussu, Springer Nature. 2022. P. 293...318.

6. *Lomov S.V.* Modeling the geometry of textile composite reinforcements: WiseTex - Chapter 7. Composite Reinforcements for Optimum Performance, ed. 2. P. Boisse. 2021. P. 199...236.

7. *Ломов С.В.* Прогнозирование строения и механических свойств тканей технического назначения методами математического моделирования: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1995. 486 с.

8. *Карева Т.Ю., Николаев С.Д.* Исследование параметров строения тканей различных способов формирования. М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2004. 86 с.

9. *Егоров Н.В., Щербakov В.П.* Новый метод расчета жесткости нити при изгибе // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2010. № 5. С. 23...27.

10. *Гречухин А.П.* Способ определения жесткости нити при изгибе // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2014. № 5. С. 47...51.

11. *Металлы и сплавы: справочник / В.К. Афонин, Б.С. Ермаков, Е.Л. Лебедев и др.; под общ. ред. Ю.П. Солнцева.* СПб.: Профessional, Мир и Семья, 2003. 1066 с.

12. *Иноземцева Н.А.* Разработка метода проектирования тканей по заданному порядку фазы строения: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010.

REFERENCES

1. *Grechuhin A.P., Zajcev D.V., Ushakov S.N., Rudovskij P.N.* A method of constructing three-dimensional models of woven fabrics of carbon fibers // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2017. № 3. P. 140...144.

2. *Kolesnikov P.N., Ivanov A.N.* Tridimensional models of textiles of linen texture // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2015. № 5. P. 40...43.

3. *Beneckaya V.V., Seliverstov V.YU., Kiselev A.M. etc.* Modelling of fabrics structure // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2013. № 3. P. 23...28.

4. *Ershov S.V., Suvorov I.A., Kuznecov V.B. etc.* Synthesis of a 3d model of a woven reinforcing structure of a textile composition by means of the methodology of numerous object-oriented simulation // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2021. № 1. P. 114...119.

5. *Lomov S.V.* WiseTex – a virtual textile composites software. *Advanced Weaving Technology.* Y. Kyosev and F. Boussu, Springer Nature. 2022. P. 293...318.

6. *Lomov S.V.* Modeling the geometry of textile composite reinforcements: WiseTex - Chapter 7. Composite Reinforcements for Optimum Performance, ed. 2. P. Boisse. 2021. P. 199...236.

7. *Lomov S.V.* Forecasting the structure and mechanical properties of technical fabrics by mathematical modeling methods: Diss. ... Doctor of Technical Sciences. St. Petersburg, 1995. 486 p.

8. *Kareva T.YU., Nikolaev S.D.* Issledovanie parametrov stroeniya tkanej razlichnykh sposobov formirovaniya. М.: MGTUim. A.N. Kosygina, 2004. – 86 p.

9. *Egorov N.V., Shcherbakov V.P.* A new method for calculating the stiffness of a thread during bending // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2010. No. 5. P. 23...27.

10. *Grechukhin A.P.* The method of determining the rigidity of the thread at the bend // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2014, No. 5. P. 47...51.

11. *Metally i splavy: spravochnik / V.K. Afonin, B.S. Ermakov, E.L. Lebedev and others; edited by Yu.P. Solntsev.* SPb.: Professional, Mir i Sem'ya, 2003. 1066 p.

12. *Inozemceva N.A.* Razrabotka metoda proektirovaniya tkanej po zadannomu poryadku fazy stroeniya: dis. ... kand. tekhn. nauk. Moskva, 2010.

Рекомендована НОЦ «Центр компетенций текстильной и легкой промышленности» ИВГПУ. Поступила 22.05.24.