

УДК 677.024

DOI 10.47367/0021-3497_2021_4_113

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ
ТРЕХМЕРНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ТКАНЕЙ
С ПЕРЕВЯЗКОЙ ОДНОЙ СИСТЕМОЙ НИТЕЙ В ЗОНЕ ФОРМИРОВАНИЯ***

**THE METHOD OF CALCULATING THE SURFACE DENSITY
OF THREE-DIMENSIONAL ORTHOGONAL FABRICS
WITH CROSSLINK BY A SINGLE SYSTEM
OF THREADS IN THE FORMATION ZONE**

А. П. ГРЕЧУХИН, А. ХАБИБУЛЛОЕВ, П.Н. РУДОВСКИЙ, М.Д. РУДКОВСКИЙ

A.P. GRECHUKHIN, A. KHABIBULLOEV, P.N. RUDOVSKY, M.D. RUDKOVSKY

(Костромской государственный университет)

(Kostroma State University)

E-mail: niskstu@yandex.ru

В статье рассматривается подход к расчету параметров трехмерных ортогональных тканей с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования таких, как вес одного погонного метра ткани, поверхностная плотность ткани, длина нити, необходимая для формирования паковок, уработка нитей горизонтального и вертикального утков в ткани. Учтена спе-

* Работа выполнена в рамках инновационного проекта по программе СТАРТ Фонда содействия инновациям (контракт 3523ГС1/57510от 25.03.2020 г.).

цифика технологии, когда нити утка прокладываются петлей, а также заложена возможность предварительного расчета параметров ткани с учетом объемной доли волокна в комплексной нити. Полученные расчетные данные проверены на выработанном опытном образце трехмерной ортогональной пятислойной ткани из арамидных нитей и получены удовлетворительные показатели сходимости расчетного метода с экспериментом, что позволяет использовать предложенные подходы к проектированию технологического процесса таких тканей.

The article discusses an approach to calculating the parameters of three-dimensional orthogonal fabrics with bandaging with one system of threads in the formation zone as the weight of 1 running meter of fabric, the surface density of the fabric, the length of the thread required for the formation of packages, the processing of the threads of horizontal and vertical wefts in the fabric. The specificity of the technology, when the weft threads are looped, is taken into account, as well as the possibility of preliminary calculation of the parameters of the fabric, taking into account the volume fraction of the fiber in the complex thread. The calculated data obtained were tested on a developed prototype of a three-dimensional orthogonal five-layer fabric made of aramid yarns and satisfactory indicators of the convergence of the calculation method with experiment were obtained, which makes it possible to use the proposed approaches to the design of the technological process of such fabrics.

Ключевые слова: трехмерная ортогональная ткань, параметры ткани, поверхностная плотность, уток, основа, уработка нити, объемная доля волокна, толщина ткани.

Keywords: three-dimensional orthogonal fabric, fabric parameters, areal density, weft, warp, runner length, fiber volume fraction, fabric thickness.

Трехмерные цельнотканые материалы исследуются уже продолжительное время. При этом существует множество обоснований того, почему же данные материалы имеют преимущества перед слоистыми изделиями, полученными склеиванием однослойных и многослойных тканей небольшой толщины. В последнее время производители начинают внедрение новых материалов на основе трехмерных тканей, так как двумерные текстильные материалы уже не позволяют добиться существенных преимуществ в прочности и снижении веса. Наиболее известным из таких технических решений являются авиационные двигатели LEAP, в производстве которых используются цельнотканые трехмерные изделия [1].

Более того, существует несколько принципиально различных технологических вариантов создания трехмерных текстильных изделий – классические многослойные

ткани, слоисто-каркасные ткани, трехмерные ортогональные ткани и т.д. Поэтому говорить о преимуществах трехмерных тканых материалов надо не просто в контексте 3D-структуры, а в контексте вида нагрузки, типа переплетения и технологии изготовления.

Однако уже на этапе исследований можно встретить противоречивые мнения на счет того, как 3D-текстильный материал работает при нагрузке. Например, в исследовании [2] указывается на важнейшую роль армирования в третьем направлении на прочность композитного изделия, и в то же время в работе [3] делается вывод о том, что нить, формирующая третье направление, гасит только 1% энергии удара (по лицевой стороне ткани), и она должна быть максимально тонкой. Очевидны различные подходы к моделированию композитов и изделия в виде ткани. В 3D-ортогональных

тканях нити располагаются практически без изгибов [4], в результате чего изделия имеют повышенную на 15...20% прочность к ударным воздействиям за счет того, что энергия удара или силовое воздействие на материал распространяется на большую площадь [5...9].

На основе разработанной технологии получения трехмерных ортогональных тканей с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования [10] возможно создание 3D-ортогональных тканей со сложной формой поперечного сечения. При этом нити двух уточных систем прокладываются петлей в зоне формирования. В [11] определены рациональные параметры системы заправки нитей при формировании такой ткани, а в [12] установлены основные факторы, влияющие на плотность расположения нитей горизонтального и вертикального утков.

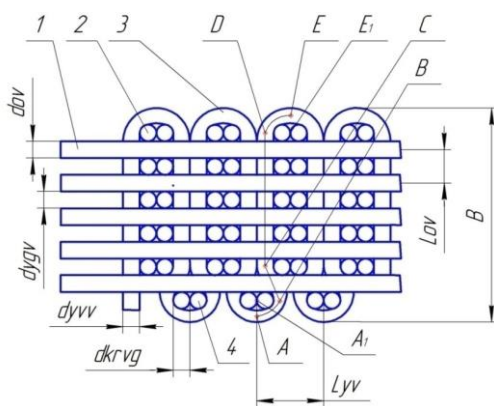


Рис. 1

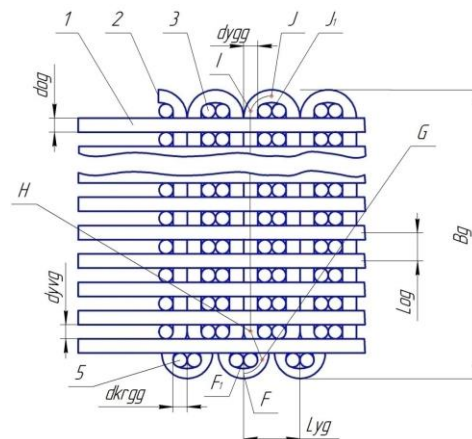


Рис. 2

Методы

Для расчета рассмотрим разрез ткани вдоль нитей основы (рис. 1 – схема расположения нитей основы и утка (вид сбоку вдоль нитей основы): 1 – нити основы; 2 – нити горизонтального утка; 3 – нити вертикального утка; 4 – кромочная нить, фиксирующая вертикальные уточные нити; 5 – кромочная нить, фиксирующая горизонтальные уточные нити; d_{0v} – поперечник по вертикали нитей основы в ткани; d_{0g} – поперечник по горизонтали нитей основы в ткани; d_{yv} – поперечник по вертикали вертикальных нитей утка в ткани; d_{yg} – поперечник по горизонтали вертикальных нитей утка в ткани; d_{ygv} – поперечник по верти-

Для формирования заправочной линии станка и подготовки нитей необходимо провести расчет расхода пряжи на единицу длины ткани (или же расчет поверхностной плотности). Так как предложенная технология [10] имеет специфику (прокладывание нити петлей), в литературе подходы к расчету поверхностных плотностей подобных тканей не представлены. На основе прогнозных значений по поверхностной плотности материала будут созданы 3D-модели для проведения виртуальных испытаний. Поэтому целью настоящей работы является разработка методики расчета поверхностной плотности и расхода нитей для выработки трехмерной ортогональной ткани с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования.

кали горизонтальных нитей утка в ткани; d_{ygg} – поперечник по горизонтали горизонтальных нитей утка в ткани; d_{krvg} – поперечник по горизонтали вертикальных кромочных нитей; d_{krvg} – поперечник по горизонтали вертикальных кромочных нитей; L_{0v} – геометрическая плотность нитей основы по вертикали; L_{0g} – геометрическая плотность нитей основы по горизонтали; B_g – ширина ткани; B – толщина ткани; L_{yg} – расстояние между слоями горизонтальных систем нитей; L_{yv} – расстояние между слоями вертикальных систем нитей) и горизонтального утка (рис. 2 – схема расположения нитей основы и утка (вид сверху вдоль нитей основы)). Расположение нитей в трехмер-

ных ортогональных структурах максимально плотное, особенно при использовании комплексных нитей (например, арамидных, углеродных, базальтовых). Согласно предложенному способу формирования ткани [10] нити вертикального и горизонтального утков прокладываются петлей и фиксируются кромочной нитью.

Уработка уточных вертикальных нитей (a_{yv}) в ткани будет определяться длиной заработанной в ткань нити (ℓ_{yv}) и расстоянием между петлями вертикальных систем нитей (L_{yv}):

$$a_{yv} = 100 \frac{2l_{yv} - L_{yv}}{2l_{yv}}, \quad (1)$$

L_{yv} может быть определено по формуле:

$$L_{yv} = 2d_{yvv} + 2d_{ygg}. \quad (2)$$

Расстояние между нитями основы (L_o) определяется по формуле:

$$L_{og} = d_{og} + d_{yvg}. \quad (3)$$

$$L_{BC} = \sqrt{\left(\frac{d_{krvg}}{2} + \frac{d_{yvv}}{2}\right)^2 + \left(d_{ov} + \frac{d_{ygv}}{2} + \frac{d_{krvv}}{2}\right)^2}, \quad (7)$$

L_{CD} определяется следующим образом:

$$L_{\ell_{CD}} = (d_{ov} + d_{ygv})(K_v - 1), \quad (8)$$

где K_v – количество слоев нитей основы;

L_{DE} приближенно определяется из прямоугольного треугольника E_1ED :

$$L_{DE} = \sqrt{L_{E_1E}^2 + L_{E_1D}^2}, \quad (9)$$

$$L_{DE} = \sqrt{\left(\frac{d_{yvv}}{2} + \frac{d_{ygv}}{2}\right)^2 + \left(d_{ygg} + \frac{d_{yvv}}{2}\right)^2}. \quad (10)$$

Зная длину петли ABCDE, определяем длину нити вертикального утка в ℓ метре ткани (ℓ_v):

$$\ell_v = \frac{1000}{L_{yv}} 2\ell_{yv}. \quad (11)$$

Уработка уточных горизонтальных нитей (a_{yg}) в ткани (рис. 2) будет определяться длиной заработанной в ткань нити (ℓ_{yg}) и расстоянием между слоями вертикальных

Для определения уработки вертикальных нитей утка необходимо знать длину петли (ℓ_{yv}) нити, определяемую точками ABCDE (рис.1). Для упрощения расчетов предлагаем рассчитывать ее в виде ломаной ABCDE:

$$\ell_{yv} = L_{AB} + L_{BC} + L_{CD} + L_{DE}. \quad (4)$$

L_{AB} приближенно определяется из прямоугольного треугольника A_1AB :

$$L_{AB} = \sqrt{L_{A_1A}^2 + L_{A_1B}^2}, \quad (5)$$

$$L_{AB} = \sqrt{\left(\frac{d_{yvv}}{2} + \frac{d_{krvv}}{2}\right)^2 + \left(d_{krvg} + \frac{d_{yvv}}{2}\right)^2}, \quad (6)$$

где d_{krvv} – поперечник по вертикали вертикальной кромочной нити (на рис. 1 не показан).

L_{BC} вычисляется по формуле:

систем нитей (L_{yg}), используя известные из теории ткачества зависимости:

$$a_{yg} = 100 \frac{2\ell_{yg} - L_{yg}}{2\ell_{yg}}. \quad (12)$$

L_{yg} может быть определено по формуле:

$$L_{yg} = L_{yv}. \quad (13)$$

Для определения уработки вертикальных нитей утка необходимо знать длину петли (ℓ_{yg}) нити, определяемую точками FGHIJ (рис. 2). Для упрощения расчетов предлагаем рассчитывать ее в виде ломаной FGHIJ:

$$\ell_{yg} = L_{FG} + L_{GH} + L_{HI} + L_{IJ}. \quad (14)$$

L_{FG} приближенно определяется из прямоугольного треугольника F_1FG :

$$L_{FG} = \sqrt{L_{F_1F}^2 + L_{F_1G}^2}, \quad (15)$$

$$L_{FG} = \sqrt{\left(\frac{d_{ygg}}{2} + \frac{d_{krgv}}{2}\right)^2 + (d_{krgg} + \frac{d_{ygg}}{2})^2}, \quad (16)$$

L_{GH} вычисляется по формуле:

$$L_{GH} = \sqrt{(d_{krgg} + \frac{d_{ygg}}{2})^2 + (d_{og} + \frac{d_{yvg}}{2} + \frac{d_{krgv}}{2})^2}. \quad (17)$$

L_{HI} определяется следующим образом:

$$L_{HI} = (d_{og} + d_{yvg})(K_{vv} - 1), \quad (18)$$

где K_{vv} – количество столбцов нитей основы по горизонтали, которое приближенно можно определить по следующему выражению;

$$K_{vv} = \frac{B_g}{Log}. \quad (19)$$

L_{IJ} приближенно определяется из прямоугольного треугольника JJ_1I :

$$L_{IJ} = \sqrt{L_{J_1I}^2 + L_{JJ_1}^2}, \quad (20)$$

$$L_{IJ} = \sqrt{\left(\frac{d_{yvg}}{2} + \frac{d_{ygg}}{2}\right)^2 + (d_{yvv} + \frac{d_{ygg}}{2})^2}. \quad (21)$$

Результаты и обсуждение

Используя представленные выше зависимости, можно рассчитать вес одного погонного метра ткани, поверхностную плотность ткани, длину нити, необходимую для формирования ткани. Однако возникает сложность в определении поперечников нитей для расчета. В тканях, которые вырабатываются из комплексных нитей, размеры поперечников нитей существенно зависят от плотностей их расположения. Например, чем больше плотность расположения нитей основы по горизонтали, тем меньше будут поперечники нити по горизонтали и тем больше станут поперечники по вертикали, что вызовет увеличение толщины ткани. Поэтому, если при проектировании ткани не известна линейная плотность, ее можно рассчитать, отталкиваясь от размеров поперечников нитей, плотности вещества нитей и объемной доли волокна в них. Если же линейная плотность известна, то необходимо определить взаи-

где d_{krgv} – поперечник по вертикали горизонтальной кромочной нити (на рис. 2 не показан).

мосьвязь между вертикальными и горизонтальными поперечниками нитей. Площадь поперечного сечения (S) может быть определена по формуле:

$$S = \frac{T}{\rho \cdot L \cdot V_f}, \quad (22)$$

где T – линейная плотность нити, текс; ρ – плотность материала нити, кг/м^3 ; L – длина нити (в случае задания плотности нити в текс, составляет 1 м); V_f – объемная доля волокна в нити.

Форму нити можно моделировать на основе методики, изложенной в [13]. Как наиболее простой вариант, зададимся поперечным сечением в виде эллипса. В этом случае площадь поперечного сечения будет:

$$S = \pi \cdot d_v/2 \cdot d_g/2, \quad (23)$$

где d_v – поперечник нити по вертикали; d_g – поперечник нити по горизонтали.

Далее, с использованием известных соотношений, производим расчет длин нитей и массы ткани.

Длина нити вертикального утка (L_v) в одном погонном метре ткани определяется по формуле:

$$L_v = K_{vv} \cdot 2\ell_{yv} \cdot \frac{1000}{L_{yv}}. \quad (24)$$

Масса нити вертикального утка (M_v) в 1 м^2 ткани:

$$M_v = T_v L_v / B_g \cdot 1000000. \quad (25)$$

Длина нити горизонтального утка (L_g) в одном погонном метре ткани определяется по формуле:

$$L_g = K_v \cdot 2\ell_{yv} \cdot 1000 / L_{yg}. \quad (26)$$

Масса нити горизонтального утка (M_g) в 1 м^2 ткани:

$$M_g = T_g L_g / B_g \cdot 1000000. \quad (27)$$

Длина нити основы (L_{lo}) в одном погонном метре ткани определяется по формуле:

$$L_{lo} = K_v K_{vv}. \quad (28)$$

Масса нити основы (M_o) в 1 м^2 ткани:

$$M_o = T_o L_{lo} / B_g \cdot 1000000. \quad (29)$$

Массу кромочных нитей, фиксирующих вертикальные нити, принимаем как массу нити горизонтального утка в одном слое. Массой кромочных нитей, фиксирующих горизонтальные уточные нити, пренебрегаем.

Для проверки предложенной методики выбрана трехмерная ортогональная ткань из арамидных нитей, выработанная по технологии [10...12] в Костромском государственном университете. Линейная плотность нитей основы 644 текс, нитей утка 322 текс (прокладка петель, суммарная линейная плотность в одной прокидке 644 текс). Ширина ткани (B_g) 300 мм. Количество вертикальных нитей утка (K_{vv}) 75. Наибольшим поперечным деформациям в таких типах тканей подвержены нити ос-

новы и горизонтального утка. Они могут в больших пределах заполнять все просветы между нитями. Поэтому их поперечные сечения выбраны в виде эллипсов. Поперечные сечения нитей кромок в меньшей степени деформированы, поэтому их форма принята в виде круга.

Фрагмент выработанной ткани из арамидных нитей представлен на рис 3.



Рис. 3

Определим параметры ткани, задавшись плотностями расположения нитей (расстояния между нитями). Задав K_{vv} в качестве входного параметра, получаем сумму диаметров d_{og} и d_{yvg} , которая определит расстояние между нитями основы (L_o). Аналогично можно поступить и с расстояниями между столбцами горизонтального утка (L_{yg}). Входные параметры представлены в табл. 1. Расчет диаметров проводился с использованием формул (22) и (23).

Т а б л и ц а 1

Параметры	Обозначение	Значение
Количество слоев нитей основы	K_v	5
Количество нитей вертикальной системы	K_{vv}	75
Расстояние между нитями основы, мм	L_o	4
Расстояние между нитями утка, мм	L_{yg}	2,46
Ширина ткани, мм	B_g	300
Объемная доля волокна в нити, мм	V_f	0,85
Плотность материала нити, кг/м^3	ρ	1440
Линейная плотность основных нитей, текс	T_o	644
Линейная плотность горизонтальных нитей, текс	T_g	322
Линейная плотность вертикальных нитей, текс	T_v	322

Результаты расчета представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Параметры	Обозначение	Расчетное значение	Экспериментальные значения (отклонение, %)
Толщина ткани, мм	B	4,3	4,5 (4,4)
Длина нити вертикального утка в 1 метре ткани, м	L_v	4,6	4,65 (1,1)
Длина нити горизонтального утка в 1 метре ткани, м	L_g	245	240 (2,1)
Длина нити основы в 1 метре ткани, м	L_{lo}	1	
Масса нити вертикального утка в 1 м^2 ткани, кг	M_v	0,368	
Масса нити горизонтального утка в 1 м^2 ткани, кг	M_g	1,307	

Масса нити основы в 1 м ² ткани, кг	M _o	0,8	
Масса кромочных нитей, фиксирующих вертикальный уток в 1 м ² ткани, кг	M _k	0,261	
Поверхностная плотность ткани, кг/м ²	M	2,736	2,6 (5,2)
Уработка уточных горизонтальных нитей, %	a _{yg}	99,6	
Уработка уточных вертикальных нитей, %	a _{yv}	64,8	
Поперечник по горизонтали горизонтальных нитей утка, мм	d _{ygg}	1,05	
Поперечник по вертикали вертикальных нитей утка, мм	d _{yvv}	0,186	
Поперечник по вертикали вертикальной кромочной нити, мм	d _{krvv}	0,8	
Поперечник по горизонтали вертикальных кромочных нитей, мм	d _{krvg}	0,8	
Поперечник по вертикали горизонтальных нитей утка в ткани, мм	d _{ygv}	0,32	
Поперечник по вертикали нитей основы в ткани, мм	d _{ov}	0,305	
Поперечник по горизонтали вертикальных кромочных нитей, мм	d _{krvg}	0,8	
Поперечник по горизонтали горизонтальных кромочных нитей, мм	d _{krvg}	0,8	
Поперечник по горизонтали вертикальных нитей утка в ткани, мм	d _{yvg}	1,8	
Поперечник по горизонтали нитей основы в ткани, мм	d _{og}	2,2	

Оценка точности расчетов проведена сравнением с фактическими значениями длин нитей вертикального и горизонтального утков, поверхностной плотностью и толщиной ткани. Результат оценки точности представлен в табл. 2.

ВЫВОДЫ

1. Получены зависимости, позволяющие прогнозировать параметры трехмерных ортогональных тканей для подготовки станка к заправке.

2. Учтена специфика технологии, когда нити утка прокладываются петлей, а также заложена возможность предварительного расчета параметров ткани с учетом объемной доли волокна в комплексной нити

3. Сравнение результатов расчета со значениями, полученными экспериментально показало, что погрешность определения основных параметров не превышает 6%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хилов П.А., Лукьяненко Ю.В., Белинис П.Г., Коротыгин А.А. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. –2015, № 9. С.75...83.

2. Ballistic impact of 3d orthogonal woven composite by a spherical bullet: experimental study and numerical simulation / Y.M. Yu, X.J. Wang, C.W. Lim // International Journal of Engineering and Applied Sciences. – Vol. 1, 2009. P.1...18.

3. Shi W., Hu H., Sun B., Gu B. Energy absorption of 3D orthogonal woven fabric under ballistic penetration of hemispherical-cylindrical projectile // Journal of the Textile Institute. – Vol. 110. 2011. P.875...889.

4. Kadir Bilisik, Mansour H. Mohamed. Multiaxis Three-Dimensional Flat Woven Preforms – Tube Carrier Weaving // Textile Research Journal. – Vol 80(8)/ 2010: 696–711 DOI: 10.1177/0040517509340602.

5. Huang G., Zhong Z.L. Tensile behavior of 3D-woven composites by using different fabric structures // Mater Des/ – 2002; 23(7): 671–674.

6. Xiwen Jia., Baozhong Sun, Bohong Gu. Ballistic penetration of conically cylindrical steel projectile into 3D orthogonal woven composite: a finite element study at microstructure level // Journal of Composite Materials. – 45(9) 965–987 (2010).

7. Bilisik K, Karaduman N. S., Bilisik N. E. 3D fabrics for technical textile applications. In: Jeon HY, editor. Non-woven Fabrics. Intec. – 2016. P. 81...141.

8. Xiwen Jia, Zihui Xia, Bohong Gu. Nonlinear numerical predictions of three-dimensional orthogonal woven composite under low-cycle tension using multiscale repeating unit cells // International Journal of Damage Mechanics. – Vol. 24, 2015. P. 338...362.

9. Rajesh Mishra, Bijoya Kumar Behera, Jiri Militky. Impact simulation of three-dimensional woven kevlar-epoxy composites // Journal of industrial textiles. – Vol. 45, 2016. P. 978...994.

10. Патент РФ № 2643659, 02.02.18. Гречухин А.П., Ушаков С.Н., Тихомиров Л.А., Зайцев Д.В., Старинец И.В., Селиверстов В.Ю. Способ формирования трехмерной ортогональной ткани.

11. Гречухин А.П., Ушаков С.Н., Рудовский П.Н., Палочкин С.В. Определение рациональных параметров системы заправки нитей при формировании трехмерного ортогонального тканого волокнистого материала // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 5. С. 111...115.

12. Ушаков С.Н., Гречухин А.П., Рудовский П.Н., Палочкин С.В. Влияние величины смещения слоя горизонтального утка на плотность расположения вертикальных слоев нитей при формировании трехмерных ортогональных тканей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 6. С.96...100.

13. Grechukhin A.P., Rudovskiy P.N. New Geometrical Model of Woven Fabric Taking into Account the Change of Its Form, Size and Lateral Bending // FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe. – 2021; 29, 2(146): 20-24.

REFERENCES

1. Donetskii K.I., Raskutin A.E., Khilov P.A., Luk'yanenko Yu.V., Belinis P.G., Korotygin A.A. Ob"emnye tekstil'nye preformy, ispol'zuemye pri izgotovlenii polimernykh kompozitsionnykh materialov (obzor) // Trudy VIAM. – 2015, № 9. S.75...83.

2. Ballistic impact of 3d orthogonal woven composite by a spherical bullet: experimental study and numerical simulation / Y.M. Yu, X.J. Wang, C.W. Lim // International Journal of Engineering and Applied Sciences. – Vol. 1, 2009. P.1...18.

3. Shi W., Hu H., Sun B., Gu B. Energy absorption of 3D orthogonal woven fabric under ballistic penetration of hemispherical-cylindrical projectile // Journal of the Textile Institute. – Vol. 110. 2011. P.875...889.

4. Kadir Bilisik, Mansour H. Mohamed. Multiaxis Three-Dimensional Flat Woven Preforms – Tube Carrier Weaving // Textile Research Journal. – Vol 80(8)/ 2010: 696–711 DOI: 10.1177/0040517509340602.

5. Huang G., Zhong Z.L. Tensile behavior of 3D-woven composites by using different fabric structures // Mater Des/ – 2002; 23(7): 671–674.

6. Xiwen Jia., Baozhong Sun, Bohong Gu. Ballistic penetration of conically cylindrical steel projectile into

3D orthogonal woven composite: a finite element study at microstructure level // Journal of Composite Materials. – 45(9) 965–987 (2010).

7. Bilisik K, Karaduman N. S., Bilisik N. E. 3D fabrics for technical textile applications. In: Jeon HY, editor. Non-woven Fabrics. Intec. – 2016. P. 81...141.

8. Xiwen Jia, Zihui Xia, Bohong Gu. Nonlinear numerical predictions of three-dimensional orthogonal woven composite under low-cycle tension using multiscale repeating unit cells // International Journal of Damage Mechanics. – Vol. 24, 2015. P. 338...362.

9. Rajesh Mishra, Bijoya Kumar Behera, Jiri Militky. Impact simulation of three-dimensional woven kevlar-epoxy composites // Journal of industrial textiles. – Vol. 45, 2016. P. 978...994.

10. Patent RF № 2643659, 02.02.18. Grechukhin A.P., Ushakov S.N., Tikhomirov L.A., Zaytsev D.V., Starinets I.V., Seliverstov V.Yu. Spособ formirovaniya trekhmernoy ortogonal'noy tkani.

11. Grechukhin A.P., Ushakov S.N., Rudovskiy P.N., Palochkin S.V. Opredelenie ratsional'nykh parametrov sistemy zapravki nitey pri formirovanii trekhmernogo ortogonal'nogo tkanogo voloknistogo materiala // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2018, № 5. S. 111...115.

12. Ushakov S.N., Grechukhin A.P., Rudovskiy P.N., Palochkin S.V. Vliyanie velichiny smeshcheniya sloya gorizontalnogo utka na plotnost' raspolzheniya vertikal'nykh sloev nitey pri formirovanii trekhmernykh ortogonal'nykh tkaney // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2018, № 6. S.96...100.

13. Grechukhin A.P., Rudovskiy P.N. New Geometrical Model of Woven Fabric Taking into Account the Change of Its Form, Size and Lateral Bending // FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe. – 2021; 29, 2(146): 20-24.

Рекомендована кафедрой технологии и проектирования тканей и трикотажа. Поступила 16.08.21.