

УДК 677.024

DOI 10.47367/0021-3497_2024_1_211

**ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ УДАРА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ОБЪЕКТА
О ТКАНУЮ ПРЕГРАДУ ИЗ АРАМИДНЫХ НИТЕЙ***

**NUMERICAL IMPACT MODEL OF A HIGH-SPEED OBJECT
ON A WOVEN BARRIER MADE OF ARAMID THREADS**

*А.П. ГРЕЧУХИН, А.В. КУЛИКОВ, И.В. СТАРИНЕЦ,
В.Н. ЕРШОВ, П.Н. РУДОВСКИЙ*

*A.P. GRECHUKHIN, A.V. KULIKOV, I.V. STARINETS,
V.N. ERSHOV, P.N. RUDOVSKY*

(Костромской государственной университет)

(Kostroma State University)

E-mail: niskstu@yandex.ru

В работе исследованы 3D ортогональные ткани с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования. Данная технология имеет следующие особенности: нити двух уточных систем прокладываются петлей в зоне формирования, вертикальная система нитей одна и перевязка структуры ткани осуществляется в зоне формирования, используется многоуточная технология прокладывания горизонтальных уточных нитей. Приведены результаты конечно-элементного моделирования процесса баллистического воздействия на 3D ортогональную ткань и сравнимый по структуре пакет тканей полотняного переплетения. Степень пробития тканой преграды оценена путем моделирования на основе расчета скорости различных частей проникающего тела и его суммарной кинетической энергии. Установлено, что тканая преграда из 3D ортогональной ткани на 16% эффективнее поглощает кинетическую энергию удара высокоскоростного тела. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными. Расхождение составляет около 6%. Моделирование позволило установить влияние компонентов структуры ткани на энергопоглощение. Установлено, что преимущественно энергия гасится за счет трения проникающего тела о нити. Поэтому в дальнейшем необходимо исследовать влияние толщины нитей на степень энергопоглощения тканого материала.

The work investigated 3D orthogonal fabrics with ligation with one system of threads in the formation zone. This technology has the following features: the threads of two weft systems are laid in a loop in the formation zone, there is one

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20089, <https://rscf.ru/project/22-29-20089/>

vertical system of threads and the ligation of the fabric structure is carried out in the formation zone, a multi-weft technology is used for laying horizontal weft threads. The results of finite element modeling of the process of ballistic impact on 3D orthogonal fabric and a package of plain weave fabrics of comparable structure are presented. The degree of penetration of a woven barrier is estimated based on simulation by analyzing the speed of various parts of the penetrating body and its total kinetic energy. It was found that a woven barrier made of 3D orthogonal fabric absorbs the kinetic energy of a high-speed body impact by 16% more effectively. The simulation results were compared with experimental data. The discrepancy is about 6%. Modeling made it possible to establish the influence of tissue structure components on energy absorption. It has been established that the energy is predominantly extinguished due to the friction of the penetrating body on the thread. Therefore, in the future it is necessary to study the influence of thread thickness on the degree of energy absorption of woven material.

Ключевые слова: трехмерная ортогональная ткань, конечно-элементное моделирование, трехмерная модель, поперечное сечение нити, поглощение энергии.

Keywords: three-dimensional orthogonal fabric, finite element modeling, three-dimensional model, thread cross-section, energy absorption.

Введение

В статье рассмотрен вопрос численного моделирования высокоскоростного поперечного нагружения текстильных материалов (тканей) различного строения из арамидных нитей. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных при пробитии пульей пакета ткани полотняного переплетения и 3D ортогональных тканей, которые получили широкое распространение в качестве средств бронезащиты и армирующих основ композитов [14].

В работе впервые исследованы 3D ортогональные ткани с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования [5]. Данная технология имеет следующие особенности: нити двух уточных систем прокладываются петлей в зоне формирования, вертикальная система нитей одна и перевязка структуры ткани осуществляется в зоне формирования, используется многоуточная технология прокладывания горизонтальных уточных нитей.

Материалы и методы

Численное моделирование проводилось с использованием метода конечных элементов с явной схемой интегрирования.

На основе методики расчета поверхностной плотности трехмерных ортогональных тканей, изложенной в работах [6...8], а также методики создания 3D модели [9] получены модели для расчета тканей полотняного переплетения и 3D ортогональных тканей. Принято допущение, что до потери прочности арамидные нити подчиняются закону Гука. Это допущение подтверждено многими исследованиями [10...15]. Также учтен эффект влияния скорости деформирования на модули упругости и предел прочности арамидных волокон [13, 16, 17]. Для нитей используется упругая модель с повреждением материала за счет снижения основного модуля упругости волокна.

Расчетные модели построены таким образом, чтобы основная ось волокон в нитях была расположена вдоль волокна. Модули упругости второго порядка, а также модули сдвига приняты на 2-3 порядка меньше основного модуля упругости [10, 12]. Плотность материала нитей и модули упругости определены с учетом объемной доли волокна.

Использованы конечные элементы с одной точкой интегрирования, основным недостатком которых является необходимость управления возникающими режимами с нулевой энергией, называемыми режимами «песочных часов» (*hourglass*). В ходе моделирования данная энергия должна быть как можно меньше. В представленном исследовании использовался способ контроля режимов с нулевой энергией по жесткости [18].

Для контроля проникновения элементов друг в друга и порождения отрицательной контактной энергии контролировалась энергия трения и общая контактная энергия. Все контакты определены контактной моделью с эрозией элементов и обновлением контактной поверхности.

Материал пули моделировался с использованием модели Джонсона-Кука с

уравнением состояния Ми-Грюнайзена [13]. Это позволяет учитывать деформацию и разрушение пули. Пуля состоит из оболочки, стального сердечника и свинцовой рубашки.

Экспериментальные исследования образцов выполнены путем поперечного сквозного пробития образцов с фиксацией скорости пули на входе и выходе образца. Скорость пули 895 м/с. Размер образца 10×10 см. По степени падения скорости пули определяется степень соответствия расчетных и экспериментальных данных.

Исследованы несколько образцов тканей: два типа 3D ортогональной ткани и один образец ткани полотняного переплетения. Исходные данные представлены в табл. 1, свойства нитей – в табл. 2.

Т а б л и ц а 1

Параметр	Обозначение	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Тип ткани		3D ортогональная	3D ортогональная	полотняное переплетение
Количество слоев нитей	K_v	8	8	7
Расстояние между нитями основы, мм	L_o	4	4	2
Расстояние между нитями утка, мм	L_{yg}	2,20	2,01	2
Плотность материала нити, кг/м ³	ρ	1440	1440	1440
Линейная плотность основных нитей, текс	T_o	644	644	644
Суммарная линейная плотность уточных горизонтальных нитей, текс	T_g	644	644	644
Линейная плотность уточных вертикальных нитей, текс	T_v	644	322	-
Толщина ткани, мм	B	6,49	6,27	6,32
Поверхностная плотность ткани, кг/м ²	M	4,750	4,705	4,760

Т а б л и ц а 2

Параметр	Образец 1		Образец 2		Образец 3
Модули упругости E , Па					
E_1	104,5	126,9	104,5	126,9	126,9
E_2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
E_3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Модули сдвига G , Па					
G_{13}	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
G_{12}	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
G_{23}	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Плотность нити, кг/м ³	1,008	1,224	1,008	1,224	1,224

Поперечники нитей кромки в 3D ортогональных тканях и крайние нити утка 8 слоя моделировались в виде окружностей и половины эллипса соответственно с объемной долей волокна 0,85 в нитях, остальные сечения нитей были представлены в виде прямоугольников с объемной долей

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/(E_{11}(1-d)) & -v_{21}/E_{22} & -v_{31}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -v_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & -v_{32}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -v_{13}/E_{11} & -v_{23}/E_{22} & 1/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2G_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} \quad (1)$$

где E_{ij} – модули упругости; G_{ij} – модули сдвига; v_{ij} – коэффициенты Пуассона; ε_{ij} – деформации; σ_{ij} – напряжения; d – параметр повреждения.

Параметр повреждения определяется по формуле:

$$d = D \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_s}{\varepsilon_c - \varepsilon_s} \right), \quad (2)$$

где ε_s – деформация, при которой начинаются повреждения; ε_c – деформация, при которой происходят критические повреждения; D – параметр, характеризующий падение значения модуля упругости при достижении значения модуля упругости при достижении критических повреждений.

С учетом модели повреждений график, отражающий зависимость напряжения от деформации вдоль оси волокна, представлен на рис. 1.

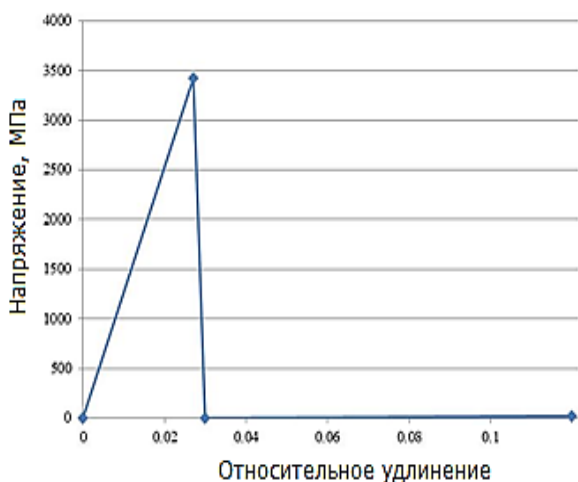


Рис. 1

волокна в нити 0,7. В ткани полотняного переплетения поперечники всех нитей моделировались в виде эллипсов, а объемная доля волокна составляла 0,85.

Связь между деформацией и напряжениями представлена в виде зависимости:

Параметры для расчета повреждений: $D=0,999$; $\varepsilon_s = 0,027$; $\varepsilon_c = 0,03$. Разрушение элемента и исключение из расчета происходит при удлинении 12%.

По каждому образцу проводили 6 выстрелов.

Результаты и обсуждение

Один из образцов (образец ткани №1 в табл. 1) после эксперимента представлен на рис. 2.

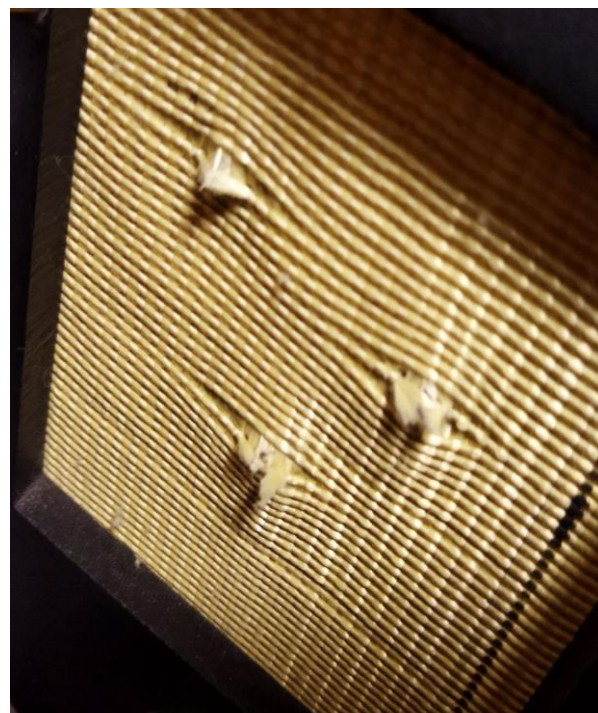


Рис. 2

Результат моделирования пробития образца ткани №1 представлен на рис. 3.

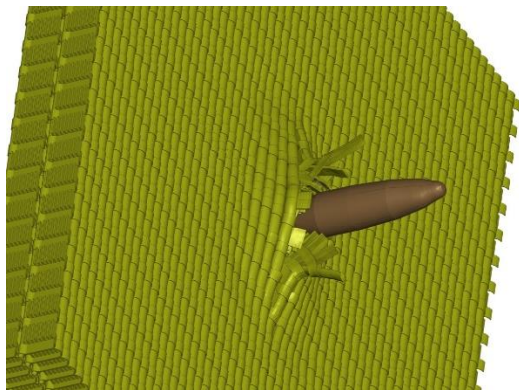


Рис.3

График изменения скоростей оболочки пули представлен на рис. 4.

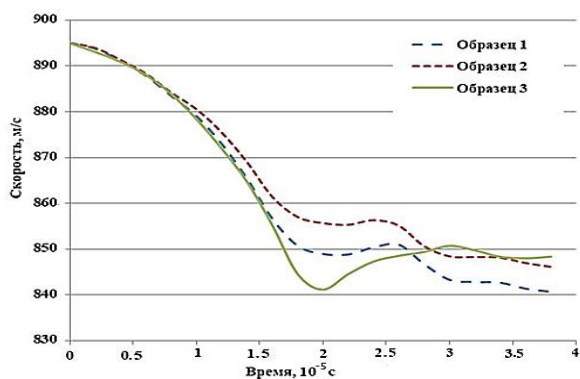


Рис. 4

Из рис. 4 видно, что на выходе из ткани минимальная скорость оболочки пули при пробитии образца № 1, а максимальная –

образцов №2 (3D ортогонального переплетения) и №3 (полотняного переплетения). Расчетная скорость различных частей пули различна, и поэтому судить о степени замедления пули необходимо, анализируя замедление всех ее частей. Это можно сделать, построив график изменения кинетической энергии всех частей пули (рис. 5).

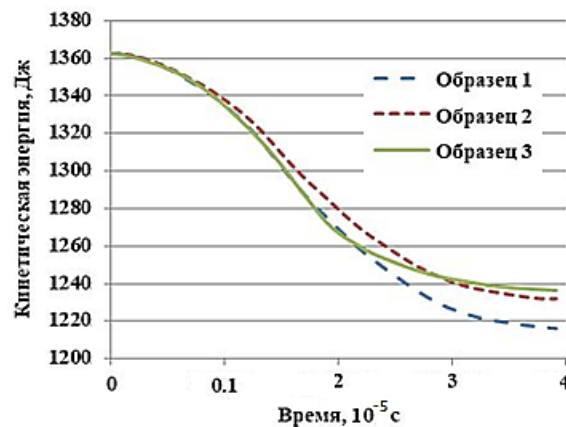


Рис. 5

В целом по сравнению с тканью полотняного переплетения поглощение кинетической энергии пули в 3D ортогональной ткани выше на 16%.

Соотношения внутренней энергии, энергии «песочных часов», контактной энергии и энергии трения представлены на рис. 6.

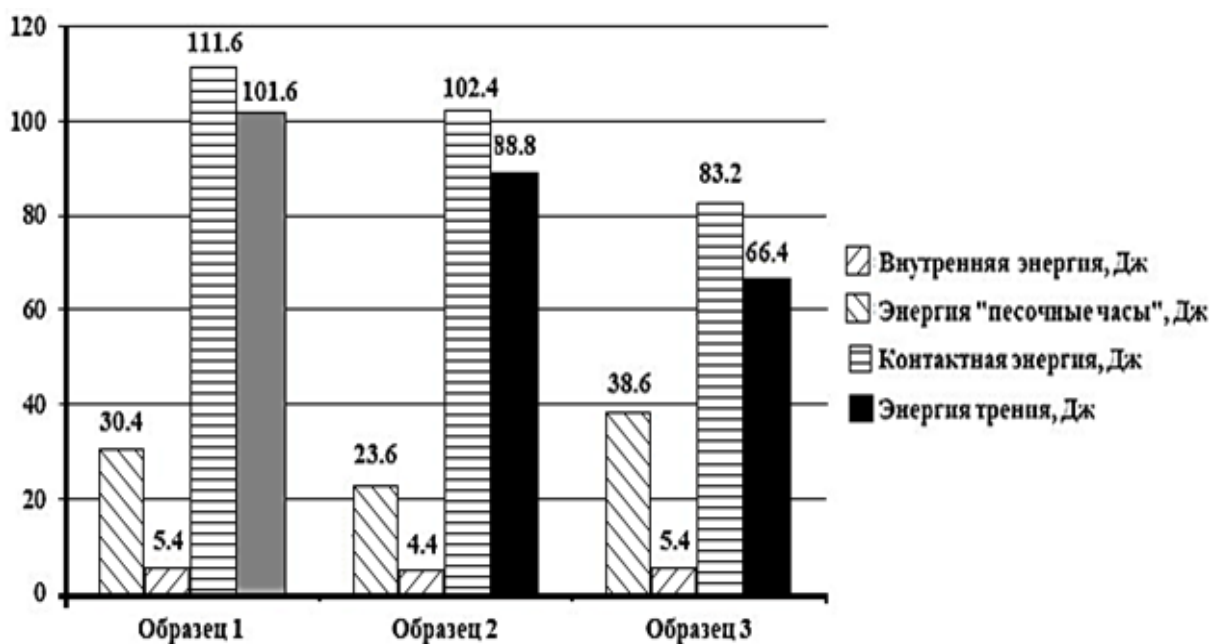


Рис. 6

Т а б л и ц а 3

	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Скорость пули на выходе, м/с (эксперимент)	51,4	46,1	45,9
Скорость пули на выходе, м/с (расчет)	54,3	48,9	46,6
Отклонение, %	5,6	6,1	1,5

ВЫВОДЫ

1. Степень пробития тканой преграды можно оценивать на основе моделирования путем расчета скорости различных частей пули и ее суммарной кинетической энергии.

2. Установлено, что тканая преграда из 3D ортогональной ткани на 16% эффективнее поглощает кинетическую энергию пули. Преимущественно энергия гасится за счет трения пули о нити. Поэтому в дальнейшем необходимо исследовать влияние толщины нитей на степень энергопоглощения тканого материала.

3. Расчетная энергия контактного взаимодействия монотонно возрастает и не падает. Энергия, которая затрачивается на подавление нетипичного деформирования конечных элементов («песочные часы»), составляет до 20 % от внутренней энергии всей расчетной системы и менее 5 % от энергии, приводящей к разрушению материала, что свидетельствует об удовлетворительном качестве моделирования.

4. Образцы 3D ортогональной ткани с более тонкими нитями вертикального утка более эффективны, чем те, у которых данная нить в 2 раза толще.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bilisik K., Karaduman N. S., Bilisik N. E. 3D-fabricsfortechnical textile applications // Non-woven Fabrics. Intec. 2016. P. 81...141.

2. Xiwen J., Zihui X., Bohong G. Nonlinear numerical predictions of three-dimensional orthogonal woven composite under low-cycle tension using multiscale repeating unit cells // International Journal of Damage Mechanics. 2015. Vol. 24. P. 338...362.

3. Rajesh M., Bijoya K.B., Jiri M. Impact simulation of three-dimensional woven kevlar-epoxy // Journal of industrial textiles. 2016. Vol. 45. P. 978...994.

4. Bandaru A.K., Vikrant V.C., Suhail A., Ramasamy A., Naresh B. Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors // International Journal of Impact Engineering. 2016. P. 1...13.

5. Пат. 2643659 РФ. Способ формирования трехмерной ортогональной ткани.

6. Гречухин А.П., Хабибуллоев А., Рудовский П.Н., Рудовский М.Д. Методика расчета поверхностной плотности трехмерных ортогональных тканей с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 4. С. 113...120.

7. 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 and Textiles in Eastern Europe. 2021. 29(2). P. 20...24.

8. Гречухин А.П., Рудовский П.Н. Развитие теории строения и формирования однослойных тканей. Кострома: КГУ, 2017. 171 с. – ISBN 978-5-8285-0917-1.

9. Гречухин А.П., Хабибуллоев А., Рудовский П.Н., Старинец И.В., Куликов А.В. Методика 3D-моделирования трехмерных ортогональных тканей // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 1 (403). С. 133...138.

10. Tran P., Ngo T., Yang E.C., Mendis P., Humphries W. Effects of architecture on ballistic resistance of textile fabrics: Numerical study // International Journal of Damage Mechanics. 2014. Vol. 23. P. 359...376.

11. Nilakantan G., Suzanne H., Halls V., Zheng J.Q. Virtual ballistic impact testing of Kevlar soft armor: Predictive and validated finite element modeling of the V0 – V100 probabilistic penetration response // Defence Technology. 2018. P. 213...225.

12. Игнатова А.В., Долганина Н.Ю., Сапожников С.Б., Шаблей А.А. Поверхностная обработка арамидной ткани и ее влияние на механику фрикционного взаимодействия нитей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 4. С. 121...137. – DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.09.

13. Kudryavtsev O.A., Sapozhnikov S.B. Yarn-level modelling of woven and unidirectional thermoplastic composite materials under ballistic impact // PNRPU Mechanics Bulletin. 2016. 3. P. 108...119.

14. Rao M.P., Duan Y., Keefe M., Powers B.M., Boggetti, T. Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric // Composite Structures. 2009. 89. P. 556...566. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.11.012.

15. Gasser A., Boisse P., Hanklar, S. Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements. 3D simulations versus biaxial tests // Computational Materials Science.

2000. 17. P. 7...20. – DOI: 10.1016/S0927-0256(99)00086-5.

16. *Tan V.B.C., Zeng X.S., Shim V.P.W.* Characterization and constitutive modeling of aramid fibers at high strain rates // *International Journal of Impact Engineering*. 2008. Vol. 35. P. 1303...1313. – DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.07.010.

17. *Zhu D., Mobasher B., Rajan S.D.* Experimental Study of Dynamic Behavior of Kevlar 49 Single Yarn // *Dynamic Behavior of Materials*, Vol. 1. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, New York, 2011. – https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8228-5_21.

18. LS-DYNA Theory Manual – Livermore: Livermore Software Technology Corporation. 2019. 886 p.

REFERENCES

1. *Bilisik K., Karaduman N. S., Bilisik N. E.* 3D-fabricsfortechnical textile applications // *Non-woven Fabrics*. Intec. 2016. P. 81...141.

2. *Xiwen J., Zihui X., Bohong G.* Nonlinear numerical predictions of three-dimensional orthogonal woven composite under low-cycle tension using multiscale repeating unit cells // *International Journal of Damage Mechanics*. 2015. Vol. 24. P. 338...362.

3. *Rajesh M., Bijoya K. B., Jiri M.* Impact simulation of three-dimensional woven kevlar-epoxy // *Journal of industrial textiles*. 2016. Vol. 45. P. 978...994.

4. *Bandaru A.K., Vikrant V.C., Suhail A., Ramasamy A., Naresh B.* Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors // *International Journal of Impact Engineering*. 2016. P. 1...13.

5. Russian patent No. 2643659. Method of formation of three-dimensional orthogonal fabric.

6. *Grechukhin A.P., Khabibulloev A., Rudovsky P.N., Rudkovsky M.D.* Calculation methods for surface density of three-dimensional orthogonal fabrics with a single thread system tying in the forming zone // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2021. № 4. P. 113...120.

7. *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 and Textiles in Eastern Europe*, 2021, 29(2). P. 20...24.

8. *Grechukhin A.P., Rudovskiy P.N.* Development of theory of structure and formation of single-layered fabrics. Kostroma: KSU, 2017. 171 p. – ISBN 978-5-8285-0917-1.

9. *Grechukhin A.P., Khabibulloev A., Rudovsky P.N., Starinets I.V., Kulikov A.V.* Method for 3D modeling of three-dimensional orthogonal fabrics // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2023. № 1 (403). P. 133...138.

10. *Tran P., Ngo T., Yang E.C., Mendis P., Humphries W.* Effects of architecture on ballistic resistance of textile fabrics: Numerical study // *International Journal of Damage Mechanics*. 2014. Vol. 23. P. 359...376.

11. *Nilakantan G., Suzanne H., Halls V., Zheng J.Q.* Virtual ballistic impact testing of Kevlar soft armor: Predictive and validated finite element modeling of the V0 – V100 probabilistic penetration response // *Defence Technology*. 2018. P. 213...225.

12. *Ignatova A.V., Dolganina N.Yu., Sapozhnikov S.B., Shabley A.A.* Aramid fabric surface treatment and its impact on the mechanics of yarn's frictional interaction // *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, no. 4, P. 121...137. – DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.09.

13. *Kudryavtsev O.A., Sapozhnikov S.B.* Yarn-level modelling of woven and unidirectional thermoplastic composite materials under ballistic impact // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. 3. P. 108...119.

14. *Rao M.P., Duan Y., Keefe M., Powers B.M., Boggetti, T.* Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric. // *Composite Structures*. 2009. 89. P. 556...566. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.11.012.

15. *Gasser A., Boisse P., Hanklar, S.* Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements. 3D simulations versus biaxial tests // *Computational Materials Science*. 2000. 17. P. 7...20. – DOI: 10.1016/S0927-0256(99)00086-5.

16. *Tan V.B.C., Zeng X.S., Shim V.P.W.* Characterization and constitutive modeling of aramid fibers at high strain rates // *International Journal of Impact Engineering*. 2008. Vol. 35. P. 1303...1313. – DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.07.010.

17. *Zhu, D., Mobasher, B., Rajan, S.D.* Experimental Study of Dynamic Behavior of Kevlar 49 Single Yarn // *Dynamic Behavior of Materials*, Volume 1. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, New York, 2011. – https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8228-5_21.

18. LS-DYNA Theory Manual – Livermore: Livermore Software Technology Corporation. 2019. 886 p.

Рекомендована кафедрой технологии и проектирования ткани и трикотажа Костромского государственного университета. Поступила 28.11.23.