

Научная статья

УДК 677. 024.1

doi 10.34216/2587-6147-2021-4-54-37-42

Александр Павлович Гречухин¹

Амирхамза Хабибуллоев²

Бегиджон Эмомалиевич Бегназаров³

Максим Денисович Рудковский⁴

^{1,2,3,4}Костромской государственной университет, г. Кострома, Россия

¹niskstu@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7732-3583>

²keepsabr007@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2991-6165>

³begnazarov96@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6649-618X>

⁴rydkoff@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1896-3804>

СРАВНИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МЯГКОЙ БРОНЕВОЙ ПРЕГРАДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ- И ТРЕХМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ТКАНЕЙ

Аннотация. В статье предложен подход к виртуальным испытаниям текстильных материалов на высокоскоростное пробитие. Проведено сравнение двух материалов, выработанных по разным технологиям – 3D ортогональной ткани и пакета ткани полотняного переплетения. Для этого подобраны такие параметры тканей, чтобы поверхностная плотность была идентична, количество слоев одинаково, линейная плотность нитей была бы одинакова. Материал нитей – арамидное волокно. В целом по оценке вдоль основы и утка область поражения для 3D ортогональной ткани выше до 30 %. При этом погашено на 31,7 % больше кинетической энергии пули.

Ключевые слова: трехмерный текстиль, ортогональная ткань, моделирование разрушения ткани, бронезащитный материал, арамидная нить, поверхностная плотность, кинетическая энергия пули

Для цитирования: Гречухин А. П., Хабибуллоев А., Бегназаров Б. Э. Рудковский М. Д. Сравнительное моделирование разрушения мягкой броневой преграды с использованием двух- и трехмерных текстильных материалов на основе ортогональных тканей // Технологии и качество. 2021. № 4(54). С. 37–42. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2021-4-54-37-42>.

Original article

Alexander P. Grechukhin¹

Amirhamza T. Khabibullov²

Begidzhon E. Begnazarov³

Maksim D. Rudkovskiy⁴

^{1,2,3,4}Kostroma State University, Kostroma, Russia

COMPARATIVE MODELLING OF THE DESTRUCTION OF A SOFT ARMOUR BARRIER USING TWO- AND THREEDIMENSIONAL TEXTILE MATERIALS BASED ON ORTHOGONAL FABRICS

Abstract. The article suggests an approach to virtual testing of textile materials for high-speed penetration. The comparison of two materials developed using different technologies – 3D orthogonal fabric and a package of plain weave fabric is carried out. For this purpose, such parameters of fabrics are selected so that the surface density is identical, the number of layers is the same, the linear density of the threads would be the same. The material of the threads is aramid fibre. In general, according to the assessment along the warp and weft, the lesion area for 3D orthogonal tissue is higher by up to 30 %. At the same time, 31.7 % more kinetic energy of the bullet was extinguished.

Keywords: three-dimensional textile, orthogonal fabric, modelling of fabric destruction, armour-protective material, aramid thread, surface density, bullet kinetic energy

For citation: Grechukhin A. P., Khabibullov A. T., Begnazarov B. E., Rudkovskiy M. D. Comparative modelling of the destruction of a soft armour barrier using two- and threedimensional textile materials based on orthogonal fabrics. Technologies & Quality. 2021. No 4(54). P. 37–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2021-4-54-37-42>.

Трехмерные цельнотканые материалы в определенных сферах использования обладают рядом преимуществ по сравнению со слоистыми материалами [1]. Производители все активнее начинают внедрение новых материалов на основе трехмерных тканей, так как двумерные текстильные материалы уже не позволяют добиться существенных преимуществ в прочности и снижении веса. Существуют различные технологические варианты создания трехмерных текстильных изделий – классические многослойные ткани, слоисто-каркасные ткани, трехмерные ортогональные ткани и т. д. Трехмерные (3D) ткани развиваются как ведущий армирующий материал в композитной промышленности. Область применения 3D-тканей, полученных по разным технологиям также различна. Преимущества 3D ортогональных тканей обозначены в работе [2]. В 3D ортогональных тканях нити располагаются практически без изгибов, 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 [3]. Именно поэтому такие типы трехмерных текстильных изделий используются при создании бронезащитных материалов [4–8]. Для формирования 3D ортогональной структуры нами разработана технология [9–10], позволяющая более эффективно укладывать нити в ткани, обеспечивая большую плотность материала. Для выработки наиболее эффективного материала требуется определить его свойства и необходимые данные для заправки. Одна из областей применения трехмерных тканей – защита от пуль. Один из путей эффективного поиска новых структур материалов в этой области – численное моделирование и сравнение свойств с прямыми аналогами материала. Поэтому целью настоящей работы является разработка новых подходов к моделированию разрушения мягкой броневой преграды с использованием двух- и трехмерных текстильных материалов.

При проектировании текстильных изделий важно понимать, какое преимущество окажет новое переплетение или технологическое решение. Для этого важно сравнить два образца. Возникает вопрос, каким образом провести идеальное сравнение? Изготовить два идентичных материала из одинаковых нитей с одинаковой поверхностной плотностью практически невозможно. Поэтому проведение виртуальных испытаний численными методами является единственным решением.

Для сравнения выбрана 3D ортогональная ткань с различным количеством слоев и ткань полотняного переплетения. Нити в ткани – 300 текс основа и 150 текс уток, волокнистый состав – арамидное волокно. Характеристики нитей приблизительно соответствуют материалу кевлар [11]. Трансверсальные модули упругости и модули сдвига принимались на несколько порядков меньше основного модуля упругости [12, 13]. Характеристики нитей:

Модули упругости, ГПа:

E1 140

E2 1,4

E3 1,4

Модули сдвига, ГПа:

G13 1,4

G12 1,4

G23 1,4

Удлинение при разрыве, %:

3,5

Коэффициенты Пуассона принимали равными нулю [12].

3D-модель трехмерной ортогональной ткани строили из трех составляющих: нити основы (выпрямлены), нити горизонтального утка (выпрямлены) и нити вертикального утка. Размеры поперечного сечения нитей основы и горизонтального утка принимались как и в модели ткани полотняного переплетения. Поперечное сечение нитей вертикального утка уменьшено в 2 раза по сравнению с нитями основы. Площадь поперечного сечения кромочной нити для фиксации вертикальных нитей принималась приблизительно равной площади вертикального утка.

Вопросы моделирования свойств тканых армирующих наполнителей для различных сфер использования актуальны. Существуют различные подходы к моделированию. Наиболее востребован в настоящее время такой метод моделирования, как метод конечных элементов. Среди множества программных продуктов для его реализации можно выделить ANSYS и входящее в данный программный продукт расширение LS-DYNA [14–17], которое наиболее широко используется для моделирования свойств композитов и текстильных материалов на основе механики композиционных материалов [18]. В LS-DYNA существует большое количество материалов для моделирования композитов и тканей. При этом могут быть использованы различные критерии разрушения.

Нити, которые используются при создании композитов, армирующих элементов, бронезилов, – углеродные, базальтовые, арамидные, кремнеземные, СВМПЭ (сверхвысокомолеку-

лярный полиэтилен), стеклянные и т. д. Углеродные и арамидные нити наиболее широко используются в производстве композитов и бронезилетов. Данные материалы являются ортотропными, т. е. имеют различные свойства в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

Это накладывает ограничения на возможность использования моделей материалов. Если моделировать тканые материалы как совокупность нитей, то нить должна быть смоделирована с учетом ориентации центральной линии (оси нити) и при этом должно учитываться направление материала.

Задачи деформирования, особенно высокоскоростного, решаются с использованием явных решателей (explicit). С учетом требования по ориентации оси материала наиболее подходящим программным продуктом для моделирования деформации на основе твердотельных элементов также является LS-DYNA.

Моделирование пробития ткани осуществлялось следующим образом: строилась 3D-модель пряж, формирующих ткань, затем собиралась 3D-модель ткани, строилась сетка конечных элементов, прикладывались нагрузки, задавались начальные условия и проводился расчет. Размер моделируемых материалов 100×100 мм.

Для создания 3D-модели использовали «КОМПАС 3D».

Эллипс, имитирующий поперечное сечение нитей, имеет размеры полуосей $0,15 \times 0,5$ мм. Это дает площадь поперечного сечения нити $0,235619 \text{ мм}^2$. Если принять, что нить имеет объемную долю волокна около 90 % и плотность 1440 кг/м^3 (aramидные волокна), то это соответствует приблизительно нити 300 текс.

Строилась средняя линия нитей, и методом экструзии (перемещение поперечного сечения вдоль средней линии нити) была получена твердотельная модель нити. Затем получили совокупность нитей, из которых формировалась твердотельная 3D-модель 3D ортогональной ткани. Параметры 3D ортогональной ткани:

Линейная плотность пряж, текс:	
основа	300
горизонтальный уток	
(в два сложения)	150×2
вертикальный уток	
(в два сложения)	60×2
кромка	300
Плотность слоев по основе, шт./см	6,66
Плотность слоев	
горизонтального утка, шт./см	7,7
Плотность	
вертикального утка, нит./см	20
Поверхностная плотность, кг/м^2	1,665

Построение 3D-модели ткани-аналога полотняного переплетения осуществляли следующим образом.

Строилась средняя линия нитей. Допускали, что уточные нити выпрямлены полностью, основа их огибает. Поперечное сечение нити представлено в виде эллипса с параметрами, указанными выше. Параметры ткани полотняного переплетения:

Линейная плотность пряж, текс	
основа	300
уток	300
Плотность слоев	
по основе, шт./см	10
Плотность слоев	
горизонтального утка, шт./см	7,4
Поверхностная плотность, кг/м^2	1,692

Параметры пули по ГОСТ 34282–2017 [19] для расчета по классу бронезащиты БР-3 представлены ниже:

Пуля	9×19 мм патрон с пулей Пст, инд. 7Н21
Тип сердечника	стальной термоупрочненный
Оружие	Пистолет Ярыгина, 9-мм, инд. 6П35
Масса, г	7
Скорость, м/с	410 ± 10

Кинетическая энергия пули составляет 517 Дж. Согласно данным Рособоронэкспорта [20], масса пули составляет 5,4 г, а скорость 445...470 м/с. Поэтому для расчетов принимали массу пули 6 г и скорость 450 м/с, что соответствует 607 Дж кинетической энергии.

В расчетах использовали упрощенную модель пули MAT_001 (elastic) [15], так как разрушения материала пули от такого малого количества слоев не произойдет. Для нитей выбран материал MAT_221 (mat_orthotropic_simplified_damage) [15]. Все материалы подчиняются закону Гука. Критерий разрушения материала установлен по предельным значениям деформации в направлении оси нити (3,5 %). Параметры пули представлены в таблице.

Визуальный результат моделирования представлен на рис. 1.

График изменения кинетической энергии представлен на рис. 2.

ВЫВОДЫ

При использовании ткани полотняного переплетения уменьшение кинетической энергии пули составило 85 Дж, а при 3D ортогональной ткани – 112 Дж. Разница составляет 31,7 %, или 5,3 % от начальной скорости пули. Выпрямлен-

ные нити в любом материале позволяют намного эффективнее работать против средства поражения. Так как модель ткани полотняного переплетения была упрощена и нити утка выпрямлены, то вдоль них область поражения существенно

выше (сопоставимо с 3D ортогональной тканью), чем вдоль основы. В целом по оценке вдоль основы и утка область поражения для 3D ортогональной ткани выше до 30 %.

Т а б л и ц а

Параметры пули

Параметр	Обозначение, размерность	Значение	
		Сердечник	Пуля
Плотность	ρ , кг/м ³	7850	7850
Модуль упругости первого рода	E , МПа	210	210
Модуль сдвига	G , МПа	80	80
Коэффициент Пуассона	ν	0,33	0,33

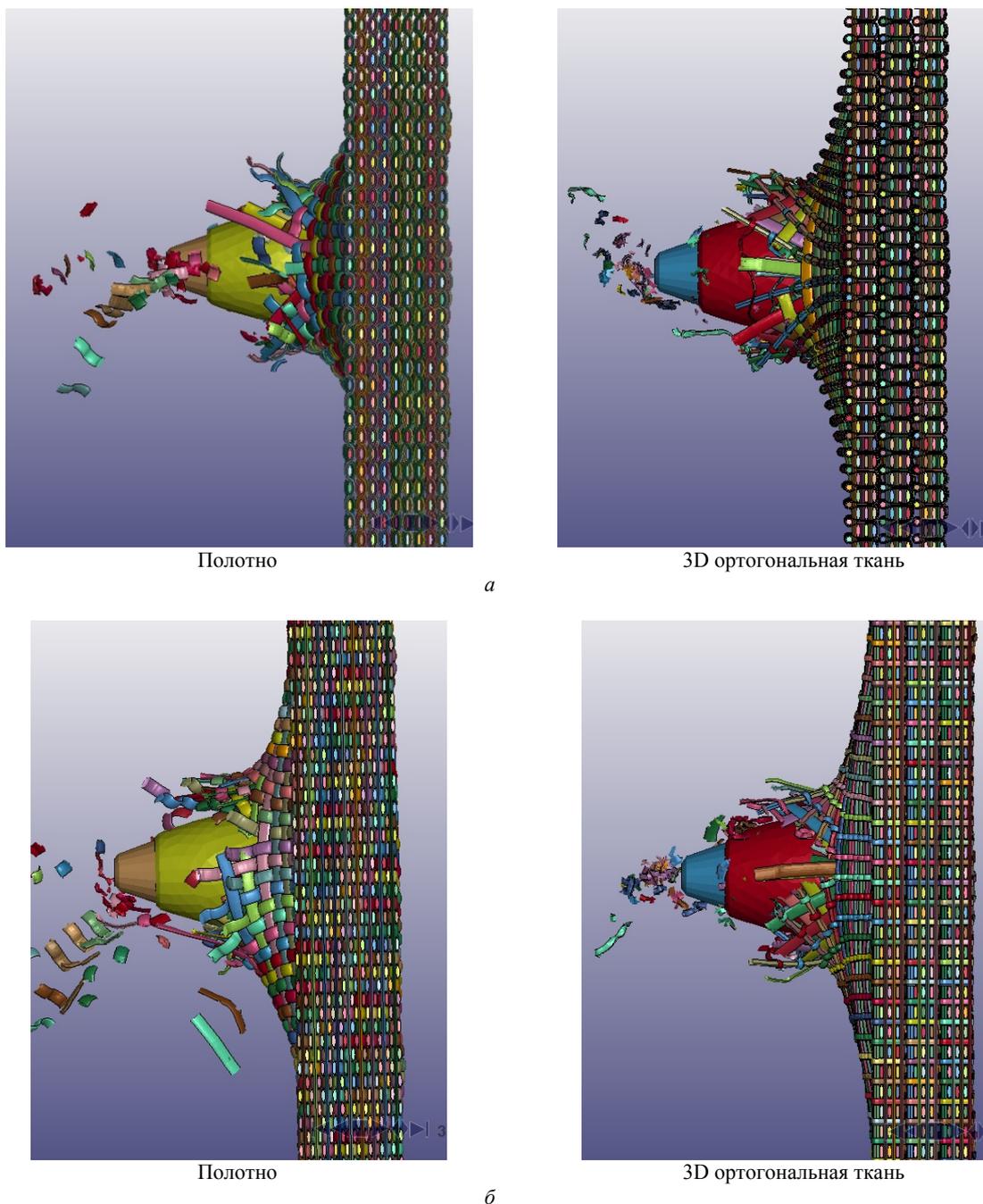


Рис. 1. Результаты моделирования:
а – вид со стороны основы; б – вид со стороны утка

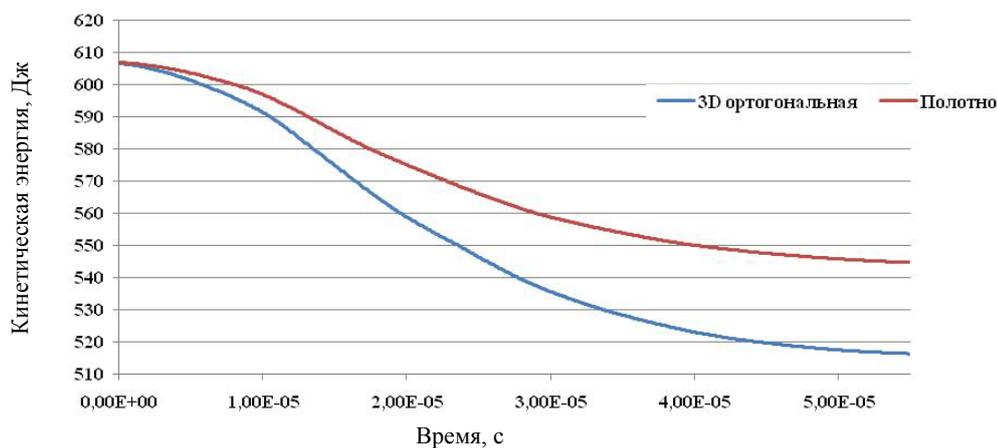


Рис. 2. График изменения кинетической энергии

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов (обзор) / К. И. Донецкий, А. Е. Раскутин, П. А. Хиллов, Ю. В. Лукьяненко, П. Г. Белинис, А. А. Коротыгин // Труды ВИАМ. 2015. № 9. С. 75–83.
2. Bilisik K., Karaduman N. S., Bilisik N. E. 3D fabrics for technical textile applications // Non-woven Fabrics. London : IntechOpen Limited, 2016. P. 81–141.
3. 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. 2010. No 45(9). P. 965–987.
4. Mishra R., Behera B. K., Militky J. Impact simulation of three-dimensional woven kevlar-epoxy composites // Journal of industrial textiles. 2016. Vol. 45. P. 978–994.
5. Innovative geometrical pre-mesh modeling strategy for 3D fibre preform manufacturing / J.-V. Riscato, X. Legrand, D. Soulat, V. Koncars // Journal of industrial textiles. 2014. Vol. 44. P. 447–462.
6. Pibo Ma, ZheGao. A review on the impact tension behaviors of textile structural composites // Journal of industrial textiles. 2013. Vol. 44. P. 572–604.
7. Xiwen J., Baozhong S., Bohong G. Numerical Simulation on Ballistic Penetration Damage of 3D Orthogonal Woven Fabric at Microstructure Level // International Journal of Damage Mechanics. 2012. Vol. 21. P. 237–266.
8. Baucom J. N., Zikry M. A. Evolution of Failure Mechanisms in 2D and 3D Woven Composite Systems Under Quasi-static Perforation // Journal of Composite Materials. 2005. Vol. 39. P. 851–863.
9. Способ формирования 3D-ортогонального тканого волокнистого материала / А. П. Гречухин, С. Н. Ушаков, Д. В. Зайцев, Л. А. Тихомиров // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2016. № 6(366). С. 118–122.
10. Патент RU 2643659 С1. Способ формирования трехмерной ортогональной ткани : заявка 2016/33672 от 16.08.2016 : Опубл. 02.02.2018, Бюл. №4 / Гречухин А. П. и др. 7 с.
11. Kudryavtsev O. A., Sapozhnikov S. B. Yarn-level modelling of woven and unidirectional thermoplastic composite materials under ballistic impact // PNRPU Mechanics Bulletin. No 3. 2016. P. 108–119.
12. Effect of textile architecture on energy absorption of woven fabrics subjected to ballistic impact / C. Yang, P. Tran, T. Ngo, P. Mendis, W. Humphries // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 553. P. 757–762.
13. Lee B., Kim C.-G. Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subjected to ballistic impacts // Advanced composite materials. 2012. Vol. 21. P. 177–192.
14. LS-DYNA. Keyword user's manual. Vol. 1. Livermore : Livermore Software Technology Corporation, 2018. 3186 p.
15. LS-DYNA. Keyword user's manual. Vol. I2. Material models. Livermore : Livermore Software Technology Corporation, 2018. 1619 p.
16. LS-DYNA. Keyword user's manual. Vol. 3. Multi physics solver. Livermore : Livermore Software Technology Corporation, 2018. 351 p.
17. LS-DYNA. Theory Manual. Livermore : Livermore Software Technology Corporation, 2019. 886 p.
18. Kaw A. K. Mechanics of composite materials. Boca Raton : Taylor and Francis, 2006. 474 p.

19. ГОСТ 34282–2017. Защита броневая автомобилей. Общие технические требования. М. : Изд-во стандартов, 2017. 15 с.
20. Рособоронэкспорт : официальный сайт. URL: <https://roe.ru/catalog/sukhoputnye-vosyka/strelkovoe-oruzhie/boepripasy-k-strelkovomu-oruzhiyu/7n21> (дата обращения: 10.07.2021).

REFERENCES

1. Donetski K. I., Raskytin A. E., Hilov P. A., Lykianenko Yu. V., Belinis P. G., Korotigin A. A. Braiding and woven textile preform es for the manufacturing fiber reinforced plastics (review). *Trudy VIAM* [Works of VIAM]. 2015;9:75–83. (In Russ.)
2. Bilisik K., Karaduman N. S., Bilisik N. E. 3D fabrics for technical textile applications. *Non-woven Fabrics*. London : IntechOpen Limited, 2016. P. 81–141.
3. 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* 2010;45(9):965–987.
4. Mishra R., Behera B. K., Militky J. Impact simulation of three-dimensional woven kevlar-epoxy composites // *Journal of industrial textiles*. 2016;45:978–994.
5. Risicato J.-V., Legrand X., Soulat D., Koncars V. Innovative geometrical pre-mesh modeling strategy for 3D fibre preform manufacturing. *Journal of industrial textiles*. 2014;44:447–462.
6. Pibo Ma, ZheGao. A review on the impact tension behaviors of textile structural composites // *Journal of industrial textiles*. 2013;44:572–604.
7. Xiwen J., Baozhong S., Bohong G. Numerical Simulation on Ballistic Penetration Damage of 3D Orthogonal Woven Fabric at Microstructure Level // *International Journal of Damage Mechanics*. 2012;21:237–266.
8. Baucom J. N., Zikry M. A. Evolution of Failure Mechanisms in 2D and 3D Woven Composite Systems Under Quasi-static Perforation // *Journal of Composite Materials*. 2005;39:851–863.
9. Grechukhin A. P., Ushakov S. N., Zajczew D. V., Tikhomirov L. A. Sposob formirovaniya 3D-ortogonal'nogo tkanogovoloknistogomateriala // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Textile Industry Technology (Series Proceedings of Higher Educational Institutions)]. 2016;6:118–122. (In Russ.)
10. Patent RU 2643659 C1. Method for forming three-dimensional orthogonal fabrics. Grechukhin A. P. and others. Opubl. 02.02.2018. (In Russ.)
11. Kudryavtsev O. A., Sapozhnikov S. B. Yarn-level modelling of woven and unidirectional thermoplastic composite materials under ballistic impact. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016;3:108–119.
12. Yang C., Tran P., Ngo T., Mendis P., Humphries W. Effect of textile architecture on energy absorption of woven fabrics subjected to ballistic impact. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;553:757–762.
13. Lee B., Kim C.-G. Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subjected to ballistic impacts. *Advanced composite materials*. 2012;21:177–192.
14. LS-DYNA keyword user's manual. Vol. 1. Livermore, Livermore Software Technology Corporation. 2018. 3186 p.
15. LS-DYNA keyword user's manual. Vol. 2. Material models. – Livermore, Livermore Software Technology Corporation. 2018. 1619 p.
16. LS-DYNA keyword user's manual. Vol. 3. Multi physics solver. Livermore, Livermore Software Technology Corporation. 2018. 351 p.
17. LS-DYNA Theory Manual.– Livermore, Livermore Software Technology Corporation. 2019. 886 p.
18. Kaw Autar K. *Mechanics of composite materials*. Boca Raton, Taylor and Francis Group. 2006. 474 p.
19. *GOST 34282–2017. Zashhita bronevaya avtomobilej. Obshhie tekhnicheskie trebovaniya* [State Standart 34282–2017. Armored car protection. General technical requirements]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2017. 15 p.
20. Rosoboronexport. URL: <https://roe.ru/catalog/sukhoputnye-vosyka/strelkovoe-oruzhie/boepripasy-k-strelkovomu-oruzhiyu/7n21> (date of access: 10.07.2021).

Статья поступила в редакцию 29.09.2021
Принята к публикации 18.11.2021