

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научная статья

УДК 004.94

EDN CBYFGH

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-2-68-36-42>

Александр Павлович Гречухин¹

Андрей Владимирович Куликов²

Владислав Алексеевич Брезгин³

Павел Николаевич Рудовский⁴

Анна Сергеевна Разина⁵

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

^{1,2,5} АО «Композит», г. Королёв, Россия

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

² kulikov58@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4472-767X>

³ brezgin.vl@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4598-9516>

⁴ pavel_rudovsky@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8675-2910>

⁵ 02421@kompozit-mv.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1205-4121>

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. В статье рассмотрены особенности моделирования высокоскоростного нагружения текстильных материалов с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Проведено сравнение нескольких ортотропных моделей материала в среде LS-DYNA на примере расчета сдвига восьмиугольного элемента с одной точкой интегрирования. Полученные результаты демонстрируют существенные различия (до 10 раз) в значениях напряжений в плоскости сдвига и до 10 % – во внутренней энергии элемента. Выявлено, что при выборе модели материала важен детальный анализ исходных параметров, контроль энергетического баланса и учет эффекта hourglass. Сделан вывод о необходимости корректной настройки ортотропных моделей и тщательного контроля сетки конечных элементов при моделировании высокоскоростных нагружений для повышения точности и достоверности результатов.

Ключевые слова: метод конечных элементов, высокоскоростное нагружение, текстильные материалы, ортотропные материалы, LS-DYNA, внутренняя энергия, hourglass-эффект, сдвиг

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00164).

Для цитирования. Исследование моделей материалов при моделировании высокоскоростного нагружения методом конечных элементов / А. П. Гречухин, А. В. Куликов, В. А. Брезгин, П. Н. Рудовский, А. С. Разина // Технологии и качество. 2025. № 2(68). С. 36–42. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-2-68-36-42>.

Original article

Alexander P. Grechukhin¹

Andrei V. Kulikov²

Vladislav A. Brezgin³

Pavel N. Rudovsky⁴

Anna S. Razina⁵

^{1,2,3,4,5} Kostroma State University, Kostroma, Russia

^{1,2,5} JSC “Kompozit”, Korolyov, Moscow Region, Russia

© Гречухин А. П., Куликов А. В., Брезгин В. А., Рудовский П. Н., Разина А. С., 2025

RESEARCH ON MATERIAL MODELS IN FINITE ELEMENT ANALYSIS OF HIGH-SPEED LOADING

Abstract. This article discusses the modeling features of high-speed loading of textile materials using the finite element method (FEM). Several orthotropic material models in LS-DYNA were analysed using an eight-node element with a single integration point under shear conditions. The results revealed significant (up to tenfold) differences in shear-plane stresses and up to 10 % deviation in the element's internal energy. The importance of proper parameter selection, energy balance monitoring, and accounting for the hourglass effect is emphasised for reliable simulation. The study concludes that accurate orthotropic model settings and careful control of the finite element mesh are essential in high-speed loading scenarios.

Keywords: finite element method, high-speed loading, textile materials, orthotropic materials, LS-DYNA, internal energy, hourglass effect, shift

Acknowledgements: the research was carried out with the financial support of the grant from the Russian Science Foundation (project No. 25-29-00164).

For citation: Grechukhin A. P., Kulikov A. V., Brezgin V. A., Rudovsky P. N., Razina A. S. Research on material models in finite element analysis of high-speed loading. Technologies & Quality. 2025. No 2(68). P. 36–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-2-68-36-42>.

Метод конечных элементов получил широкое распространение при моделировании высокоскоростного нагружения текстильных материалов [1–9].

В исследовании [6] проводится анализ высокоскоростного нагружения комбинированных 3D-тканей, где сравниваются экспериментальные данные и результаты моделирования методом конечных элементов. Однако авторы используют грубую сетку конечных элементов, не предоставляют данных по энергетическому балансу и не контролируют эффект hourglass.

Авторы [7] изучают поведение 3D ортогональных тканей под высокоскоростным ударом, с акцентом на поглощение энергии пули. Моделирование выполнено на уровне нитей, но методы моделирования подробно не описаны, а представлены лишь визуализации взаимодействия ткани и пули.

В работе [8] исследуют композитный материал на основе 3D ортогональной структуры при высокоскоростном нагружении. В работе применяется сгущение сетки конечных элементов, но, как и в предыдущих исследованиях, отсутствует анализ энергетического баланса. Авторы ограничиваются использованием одного элемента в сечении нити.

Аналогичный подход, с использованием 1–2 элементов в сечении нити применяется в исследовании [9], где проводится численное моделирование повреждений 3D ортогональных тканей на микроструктурном уровне. Ученые [2] разрабатывают численную модель для анализа пробития ткани, но также используют малое количество элементов в сечении нити. В работе отсутствует анализ контактного взаимодействия,

энергетического баланса и контроля эффекта hourglass.

Крайне важно иметь картину поведения модели материала при исследовании деформации одного элемента [10]. Тестирование одного элемента позволяет выявить ограничения в модели материала и его применимость к решаемой задаче.

Наиболее распространенный пакет конечно-элементного анализа – LS-DYNA [11]. Для волокон и нитей, как правило, используют модели материала, поддерживающие ортотропные свойства.

Для ортотропных материалов в LS-DYNA [11] используются следующие наиболее распространенные модели (табл.).

Подходы к моделированию процесса разрушения композитов и тканых материалов различаются. В случае использования композитов применяются критерии разрушения, например Чанга – Чанга и Цая – Ву, которые учитывают комплексное разрушение от осевой деформации и сдвиговой деформации в различных плоскостях [11]. При исследовании мягких тканых материалов разрушение от сдвига практически отсутствует и это необходимо учитывать при использовании моделей разрушения по названным эмпирическим критериям. Более того, оси главных напряжений в ортотропных материалах не совпадают с осями главных деформаций и осями материала [12], как это происходит в изотропных материалах. Это не позволяет в полной мере использовать в качестве критерия опцию ADD_EROSION [11], которая предусматривает разрушение по главным напряжениям, деформациям, эффективным деформациям, напряжениям фон Мизеса.

Для исследования выбраны наиболее часто встречающиеся в расчетах высокоскоростного нагружения модели ортотропных материалов: 221 и 22, 54/55, 59 (см. табл.). Последние имеют одинаковую логику расчета. Поэтому

сравнение производили между данной группой материалов и моделью 221. Все расчеты выполнены с использованием обновленной формулировки Лагранжа [11].

Т а б л и ц а

Модели ортотропных материалов LS-DYNA

Модель материала	Модель повреждений +/-	Модель разрушений +/-	Тип элементов
mat_002 orthotropic elastic	–	–	Solid Shells
mat_22 mat_composite_damage	–	+	Solid Shells
mat_54/55 mat_enhanced_composite_damage	+	+	Thin shells
mat_58 mat_laminated_composite_fabric	+	+	Shells Thick Shells
mat_59 mat_composite_failure_option_model	shells+ solid–	+	Solid Shells
mat_221 mat_orthotropic_simplified_damage	+	+	Solid

Поведение материалов в указанных моделях подчиняются закону Гука. Допустимы настройки повреждений. Однако часто в исследованиях высокоскоростного нагружения допущается, что материал остается упругим вплоть до разрушения.

Для численного эксперимента выбран восьмиузловой элемент с одной точкой интегрирования [11], который наиболее часто используется в задачах высокоскоростного нагружения. Осуществлялся сдвиг в плоскости XY (рис. 1, a – начальное положение, b – конечное положение) со скоростью 100 м/с перпендикулярно оси волокна в элементе. Ось материала в элементе меняет положение по мере его деформации. Во всех расчетах представлены истинные напряжения [11] до сдвига на 45° . Характеристики ортотропных материалов, которые используются при моделировании высокоскоростного нагружения арамидных материалов на уровне нитей [3], представлены далее.

Входные параметры модели

Модули упругости, ГПа

E1 140

E2 1,4

E3 1,4

Модули сдвига, ГПа

G13 0,05

G12 0,05

G23 0,05

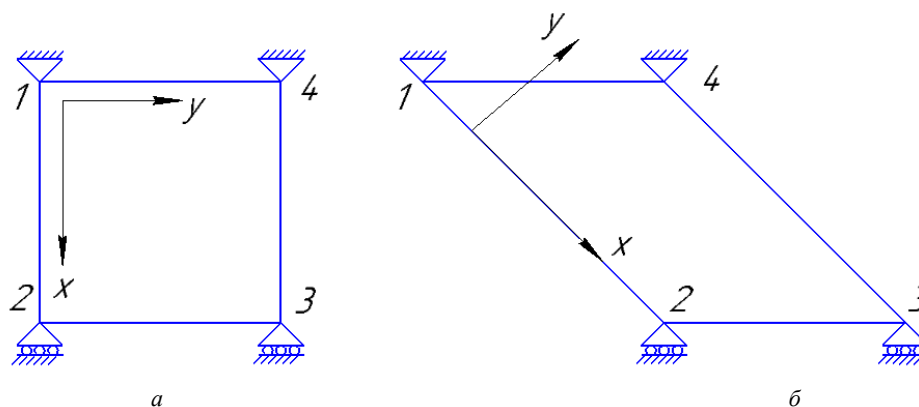
Коэффициенты Пуассона принимали близкими к нулю [13]. Схема деформации представлена на рисунке 1. Ось волокна расположена вдоль оси X , вдоль узлов 1 и 2.

Графики изменения нормальных напряжений по оси X , совпадающей с осью волокна, представлены на рисунке 2.

Графики изменения нормальных напряжений вдоль оси Y представлены на рисунке 3.

Графики изменения касательных напряжений в плоскости XY представлены на рисунке 4.

Графики изменения внутренней энергии представлены на рисунке 5.

Рис. 1. Сдвиг элемента в плоскости XY

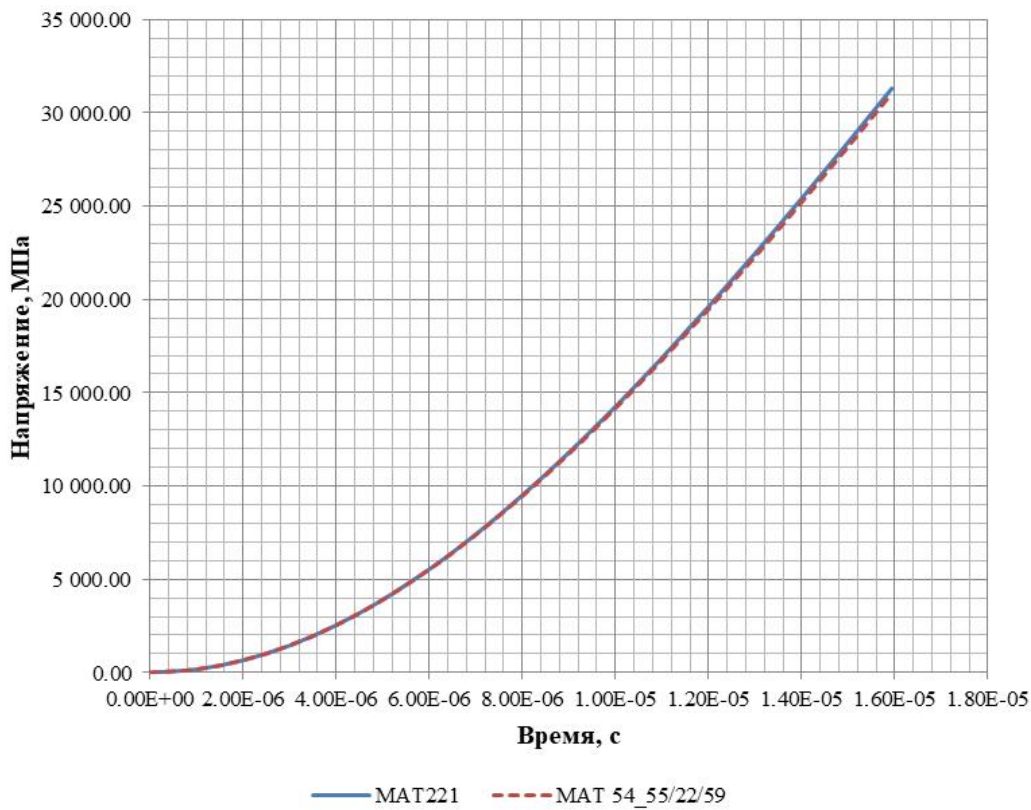


Рис. 2. Изменение напряжений по оси волокна (X)

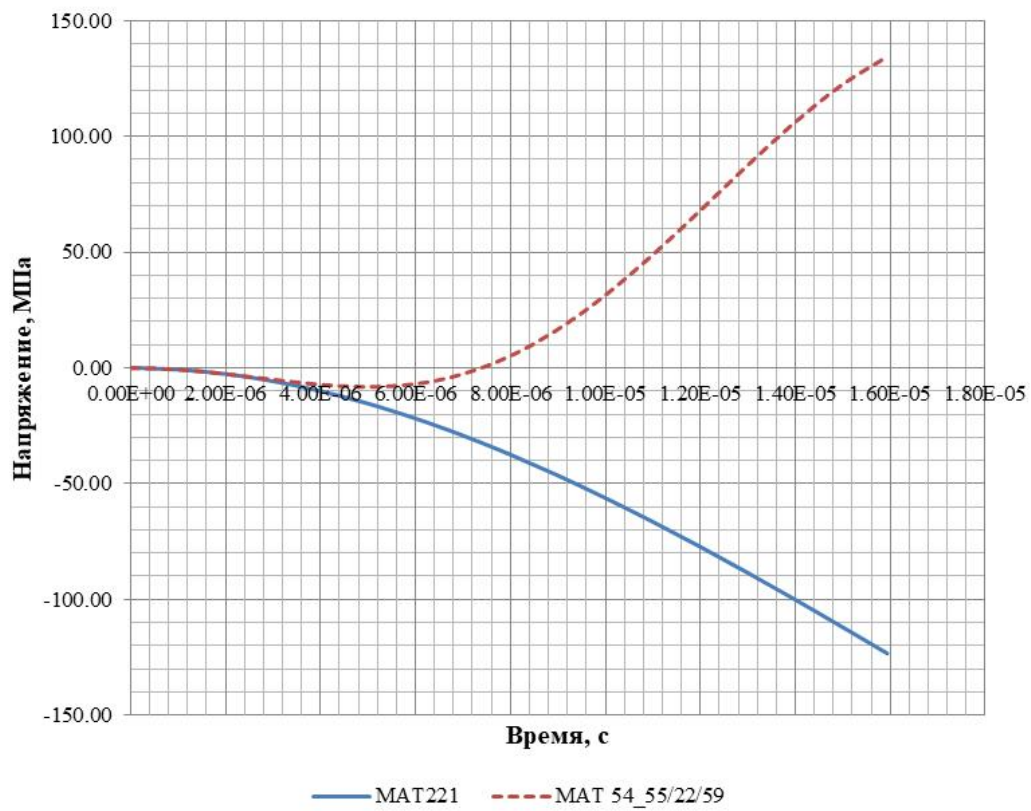


Рис. 3. Изменение напряжений вдоль оси Y

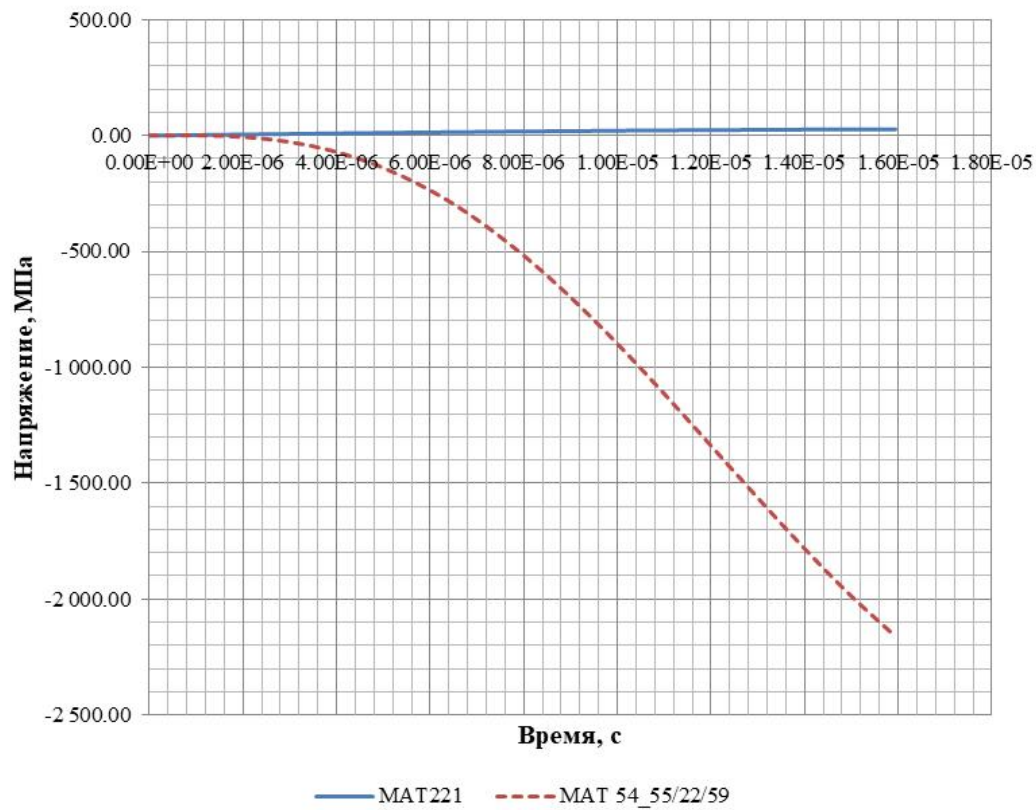


Рис. 4. Изменение напряжений в плоскости XY

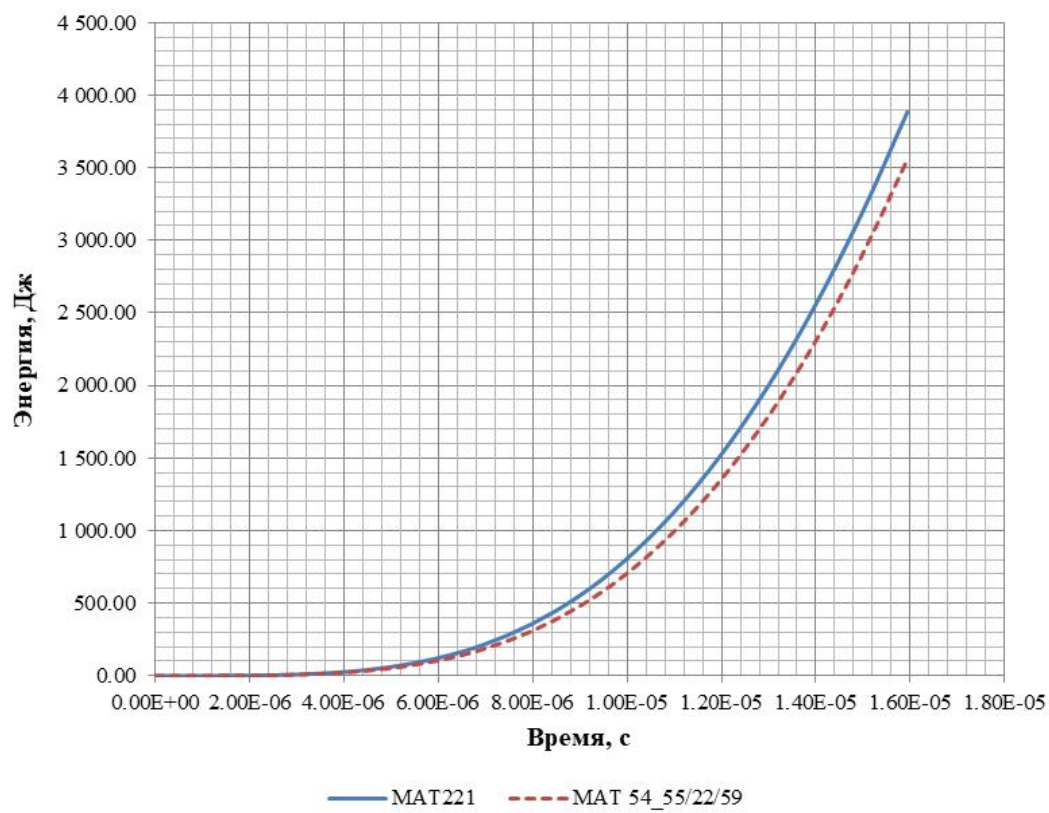


Рис. 5. Изменение внутренней энергии

Из рисунка 4 видно, что для модели материала MAT221 касательные напряжения в плоскости конечного элемента практически не возникают, т. е. эта модель материала наиболее полно соответствует текстильным нитям, которые практически не сопротивляются изгибу. Результаты расчета нормальных напряжений в направлении, перпендикулярном оси волокна, по оси Y , для исследованных материалов, как это видно из рисунка 3, существенно отличаются. Поэтому, несмотря на то что напряжения вдоль оси волокна для разных моделей материалов практически не отличаются, а максимальное отличие во внутренней энергии элемента не превышает 10 %, предпочте-

ние при расчетах высокоскоростного пробития текстильных материалов следует отдать модели MAT221. Это подтверждается результатами, приведенными в работах [14, 15].

ВЫВОД

Анализ поведения моделей материалов, используемых при конечно-элементном моделировании с использованием восьмиузлового конечного элемента с одной точкой интегрирования, показал, что при моделировании текстильных материалов, имеющих малое сопротивление изгибу, предпочтение следует отдать модели MAT221.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Effects of architecture on ballistic resistance of textile fabrics: Numerical study / P. Tran, T. Ngo, E. C. Yang, P. Mendis, W. Humphries // *International Journal of Damage Mechanics*. 2014. Vol. 23. P. 359–376.
2. Virtual ballistic impact testing of Kevlar soft armor: Predictive and validated finite element modeling of the V0–V100 probabilistic penetration response / G. Nilakantan, S. Horner, V. Halls, J. Zheng // *Defence Technology*. 2018. P. 213–225.
3. Поверхностная обработка арамидной ткани и ее влияние на механику фрикционного взаимодействия нитей / А. В. Игнатова, Н. Ю. Долганина, С. Б. Сапожников, А. А. Шаблей // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2017. № 4. С. 121–137.
4. Kudryavtsev O. A., Sapozhnikov S. B. Yarn-level modelling of woven and unidirectional thermoplastic composite materials under ballistic impact // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. N 3. P. 108–119.
5. Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric / M. P. Rao, Y. Duan, Michael Keefe, B. M. Powers, Travis Bogetti // *Composite Structures*. 2009. No. 89(4). P. 556–566.
6. Comparative analysis of experimental results and finite element simulation results of ballistic impact on 3D woven reinforced composites / F. Qian, L. Zhao, S. Zhang, G. Yao, Y. Liu // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2022. Vol. 17. doi:10.1177/155892502211389.
7. Experimental and numerical investigation of the behavior of three-dimensional orthogonal woven composite plates under high-velocity impact / Hao Su, Xuena Si, Yan Liu, Ming-ming Xu, Guang-yan Huang & Jiacong Pan // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2022. No. 30(1). P. 1–10.
8. Investigation of the Ballistic Performance of GFRP Laminate under 150 m/s High-Velocity Impact: Simulation and Experiment / F. Chen, Y. Peng, X. Chen, K. Wang, Z. Liu, C. Chen // *Polymers*. 2021. No. 13(4) P. 604.
9. Xiwen Jia, Baozhong Sun, Bohong Gua. Numerical Simulation on Ballistic Penetration Damage of 3D Orthogonal Woven Fabric at Microstructure Level // *International Journal of Damage Mechanics*. 2012. № 21. P. 237–266.
10. Osborne, M. Single-Element Characterization of the LS-DYNA MAT54 Material Model [Master's thesis]. Washington : Washington State University, 2023. 105 p.
11. LS-DYNA Theory Manual, Livermore : Livermore Software Technology Corporation, 2019. 886 p.
12. Kaw Autar K. *Mechanics of composite materials*. Boca Raton : Taylor and Francis, 2006. 474 p.
13. 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.
14. Численная модель удара высокоскоростного объекта о тканую преграду из арамидных нитей / А. П. Гречухин, А. В. Куликов, И. В. Старинец, В. Н. Ершов, П. Н. Рудовский // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2024. № 1(409). С. 211–217.

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

REFERENCES

1. 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;23:359–376.
2. Nilakantan G., Horner S., Halls V., Zheng J. Virtual ballistic impact testing of Kevlar soft armor: Predictive and validated finite element modeling of the V0–V100 probabilistic penetration response. *Defence Technology*. 2018: 213–225.
3. 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. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics]. 2017;4:121–137. (In Russ.)
4. Kudryavtsev O. A., Sapozhnikov S. B. Yarn-level modelling of woven and unidirectional thermoplastic composite materials under ballistic impact. *PNRPU Mechanics Bulletin* 3. 2016;108–119.
5. Rao M. P., Duan Y., Keefe M. Powers B. M., Bogetti T. Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric. *Composite Structures*. 2009;89(4):556–566.
6. Qian F., Zhao L., Zhang S., Yao G., Liu Y. Comparative analysis of experimental results and finite element simulation results of ballistic impact on 3D woven reinforced composites. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2022;17. doi:10.1177/15589250221138910.
7. Su H., Si X., Liu Ya., Xu M., Huang G., Pan J. Experimental and numerical investigation of the behavior of three-dimensional orthogonal woven composite plates under high-velocity impact. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2022;30(1):1–10.
8. Chen F., Peng Y., Chen X., Wang K., Liu Z., Chen C. Investigation of the Ballistic Performance of GFRP Laminate under 150 m/s High-Velocity Impact: Simulation and Experiment. *Polymers*. 2021; 13(4):604.
9. Xiwen Jia, Baozhong Sun, Bohong Gua. Numerical Simulation on Ballistic Penetration Damage of 3D Orthogonal Woven Fabric at Microstructure Level. *International Journal of Damage Mechanics*. 2012;21(2):237–266.
10. Osborne, M. Single-Element Characterization of the LS-DYNA MAT54 Material Model [Master's thesis]. Washington, Washington State University, 2023. 105 p.
11. LS-DYNA Theory Manual. Livermore, Livermore Software Technology Corporation, 2019, 886 p.
12. Kaw Autar K. *Mechanics of composite materials*. Boca Raton.: Taylor and Francis, 2006. 474 p.
13. 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.
14. Grechukhin A. P., Kulikov A. V., Starinets I. V., Ershov V. N., Rudovskiy P. N. Numerical impact model of a high-speed object on a woven barrier made of aramid threads *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2024;1(409):211–217. (In Russ.)
15. Grechukhin A. P., Khabibullaev A., Rudovsky P. N., Starinets I. V., Kulikov A. V. Method for 3D modeling of three-dimensional orthogonal fabrics. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2023;1(403):133–138. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 24.04.2025
Принята к публикации 20.05.2025