

Научная статья

УДК 677.017.8

EDN KTWSBZ

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-3-69-12-19>

Михаил Александрович Фарух

Научно-исследовательский центр ФГБУ «48 ЦНИИ» Минобороны России, Москва, Россия

faruh_mihail@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6039-9719>

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СТРУКТУРЫ ТКАНИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТКАНЫХ ГИБКИХ ПРЕГРАД ДЛЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ БРОНЕЗАЩИТЫ

Аннотация. В статье приведен обзор основных подходов к моделированию однослойных тканых структур. Рассмотрены преимущества и недостатки каждого подхода. Сделан анализ конечно-элементного представления нити для решения задач прогнозирования баллистической стойкости ткани. Указаны преимущества и недостатки описанных подходов. Выполнен анализ работ по методикам и моделям построения структуры однослойных тканей с учетом различных параметров ее строения. Подробно разобраны недостатки разработанных моделей и области их применения. Сделан обзор программного обеспечения для построения 3D-моделей однослойных тканей. На основе полученной информации предложена методика построения 3D-моделей структуры однослойной ткани, позволяющая строить их для широкого класса ткацких переплетений и учитывающая основные параметры ее строения. Сделаны общие выводы.

Ключевые слова: моделирование тканых структур, 3D-модели структуры ткани, средства индивидуальной бронезащиты, однослойные ткани, ткацкое переплетение, конечно-элементное представление нити, параметры ткани

Для цитирования: Фарух М. А. Анализ подходов к моделированию структуры ткани для проектирования тканых гибких преград для средств индивидуальной бронезащиты // Технологии и качество. 2025. № 3(69). С. 12–19. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-3-69-12-19>.

Original article

Mikhail A. Farukh

Research Center of the Federal State Budgetary Institution “48 Central Research Institute” of the Ministry of Defense of Russia, Moscow, Russia

ANALYSIS OF APPROACHES TO MODELLING FABRIC STRUCTURE FOR DESIGNING WOVEN FLEXIBLE BARRIERS FOR PERSONAL ARMOUR PROTECTION

Abstract. The article provides an overview of the main approaches to modelling single-layer woven structures. The advantages and disadvantages of each approach are considered. An analysis of the finite element representation of the thread is made to solve the problems of predicting the ballistic resistance of the fabric. The advantages and disadvantages of the described approaches are indicated. An analysis of works on methods and models for constructing the structure of single-layer fabrics is performed, taking into account various parameters of its structure. The disadvantages of the developed models and the areas of their application are analysed in detail. An overview of software for constructing 3D models of single-layer fabrics is made. Based on the information obtained, a technique for constructing the single-layer fabric structure 3D models is proposed, allowing them to be built for a wide class of weaving interlacing, at that taking into account the main parameters of its structure. General conclusions are made.

Keywords: woven structures modelling, 3D models of fabric structure, personal protective equipment, single-layer fabrics, weaving interlacing, finite element representation of thread, fabric parameters

For citation: Farukh M. A. Analysis of approaches to modelling fabric structure for designing woven flexible barriers for personal armour protection. Technologies & Quality. 2025. No 3(69). P. 12–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-3-69-12-19>.

Актуальность проектирования тканых гибких преград для средств индивидуальной бронезащиты в современных условиях для России постоянно растет. Проведение специальной военной операции, постоянно расширяющиеся санкционные пакеты против РФ со стороны зарубежных стран неизбежно приводят к решению политических задач военным путем, где основную роль будут играть передовые технологические решения и, конечно, личный состав Вооруженных сил, который нужно защищать от любого негативного воздействия со стороны противника и, в первую очередь, от осколков и огнестрельного оружия с применением отечественных технологий защиты.

Разработкой подходов к проектированию и созданию средств индивидуальной бронезащиты занималось много исследователей как в Российской Федерации, так и за рубежом. Довольно подробный обзор данных решений приведен в диссертации А. В. Игнатовой [1]. В данной статье предлагается авторский взгляд на концепцию проектирования гибких тканых преград с описанием отличий от существующих подходов и детальным анализом.

Прежде всего, необходимо отметить общую тенденцию в решении задачи прогнозирования баллистической стойкости защитных бронепакетов на основе однослойных тканей из баллистических материалов. Сущность данного подхода заключается в создании цифровой модели текстильной ткани и загрузке данной модели в САЕ-системы для последующего моделирования процесса пробития тканой преграды

внешним индентором – осколком, шариком, пулей. Это правильный подход с точки зрения сегодняшнего тренда развития цифровой экономики и создания цифровых двойников изделий и процессов. Однако каждый описываемый подход к проектированию средств бронезащиты имеет существенные отличия друг от друга.

Проведем краткий анализ данных различий. Как уже было сказано выше, прежде чем моделировать процесс пробития защитного бронепакета, все авторы в качестве исходных данных должны иметь или создать модель структуры ткани каждого слоя в пакете на уровне одиночного раппорта или представительского объема ткани с учетом действия масштабного фактора. Желательно, чтобы модель была трехмерной и представлена в формате, который мог бы быть загружен в соответствующую САЕ-систему. Это действительно важный момент, поскольку от точности исходных данных – в данном случае от точности геометрической модели структуры ткани и всего пакета – будет зависеть точность прогнозирования баллистической стойкости и время решения задачи.

В данном направлении при моделировании геометрической структуры ткани существует подход на макроуровне, мезоуровне и микроуровне. В принципе возможны на их основе и комбинированные модели ткани. Это известный подход в науке к различным техническим задачам и в том числе для задач механики ткани и нити. Представление ткани на макро-, мезо- и микроуровнях показано на рисунке 1 [1].

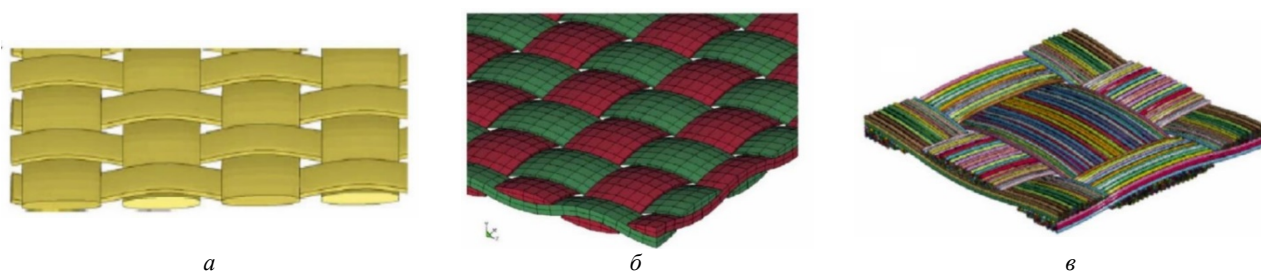


Рис. 1. Классификация подходов моделирования тканых структур:
а – макроуровень; б – мезоуровень; в – микроуровень [1]

Макроуровневый подход широко применяется при анализе баллистической стойкости ткани при ударе. При этом на данном уровне ткань моделируется монолитной пластиной с интегрированными по объему физико-механическими свойствами. Безусловными преимуществами такого подхода является принятое упрощение представления сложной структуры ткани в виде параллелепипеда, что существенно облегчает

разбиение данного объема на конечные элементы и тем самым резко снижает сложность и время решения задач механики разрушения, да еще и в динамической постановке. Однако данный подход не позволяет учесть механизмы, влияющие на рассеяние энергии при разрушении ткани внешним индентором, такие как вытягивание, распрямление, проскальзывание нитей, фрикционные контакты между ними и другие факторы.

Кроме того, само различие макро- и мезо-уровней в детальном представлении структуры ткани, безусловно, вносит существенные погрешности в решение задачи прогнозирования ее баллистической стойкости. Поэтому моделирование структуры ткани на мезоуровне на сегодняшний день является самым распространенным для решения задач механики разрушения ткани. В этом случае реальная ткань описывается на уровне одиночных нитей основы и утка с представлением их в 3-мерном твердотельном виде и она является более детализированной моделью, чем модель ткани на макроуровне. Нити в ткани представляются совокупностью объемных конечных элементов с описанием их типов и свойств, соответствующих сути решаемой задачи, из библиотеки конечных элементов применяемой САЕ-системы. Но в данном случае детализация модели ткани, кроме явных положительных факторов, приводит и к негативным последствиям – необходимости разбиения на конечные элементы сложного поперечного сечения всех нитей основы и утка в модели, что приводит к резкому увеличению числа конечных элементов и, как следствие, увеличению порядка разрешающей системы метода конечных элементов, что для решения задач механики разрушения, особенно в динамической постановке, приводит к возможности решения данных задач

только с использованием суперкомпьютерных технологий и, конечно, увеличивает время и стоимость решения поставленных задач.

Для упрощения решения задач данного класса разработчики моделей неизбежно прибегают к искусственным методам, касающимся прежде всего представления реальной тканой структуры в виде совокупности конечных элементов различного типа. Например, в статье зарубежных авторов для решения задач деформирования и разрушения многослойных тканевых структур нити основы и утка в ткани представляются в виде оболочечных конечных элементов (рис. 2) [2].

Понятны преимущества такого представления – это снижение порядка разрешающей системы уравнений метода конечных элементов в связи с заменой объемного конечного элемента на оболочечный тип элемента с существенно меньшим количеством его узлов, а следовательно, и размерностью матрицы жесткости данного элемента.

В исследовании Н. Ю. Долганиной и А. В. Игнатовой [3] аналогичная проблема высокой размерности задачи привела к допущению о представлении нитей основы и утка в ткани в виде оболочечных элементов (рис. 3).

Результаты моделирования структуры ткани при таком представлении ее в виде конечных элементов представлены на рисунке 4.

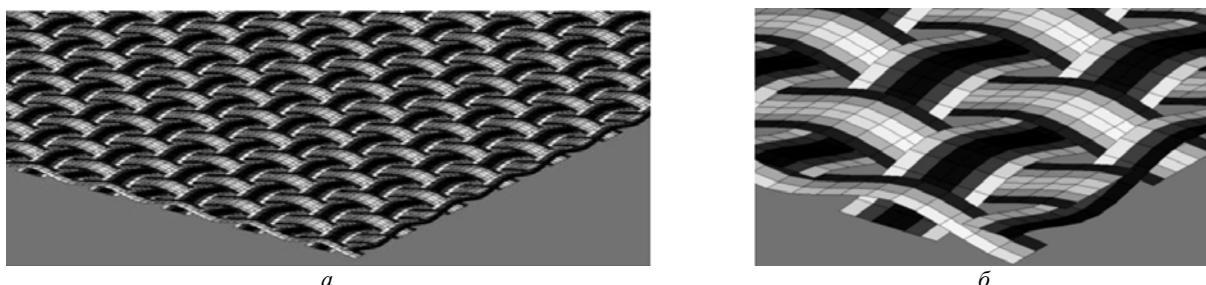


Рис. 2. Моделирование геометрии ткани с помощью оболочечных конечных элементов [2]

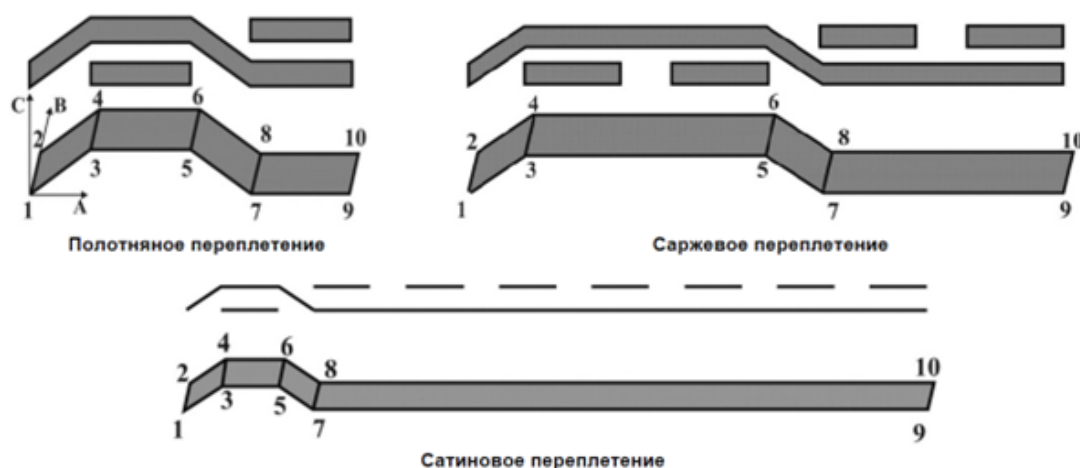


Рис. 3. Представление повторяющихся элементов различных ткацких переплетений [3]

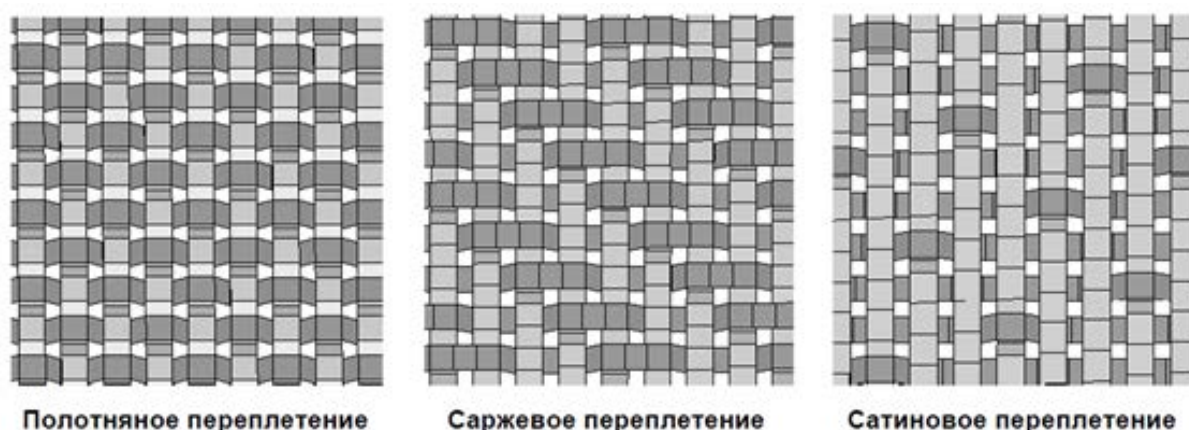


Рис. 4. Моделирование структуры ткани различных переплетений с представлением нитей основы и утка в виде оболочечных конечных элементов [3]

Как видно из рисунков 3 и 4, принятая аппроксимация нитей основы и утка в ткацких переплетениях различного вида является даже более грубой по отношению к подходу аппроксимации нитей такими же оболочечными конечными элементами на рисунке 2. Но авторы таким образом решили поставленную задачу уменьшения размерности, хотя и применяли суперкомпьютерные технологии.

В диссертационном исследовании [4] проблема высокой размерности задачи решена подобным способом. Для этого рассматривалась в расчетах не ткань, а ее ячейка периодичности – т. е. раппорт. Для простоты был взят раппорт самого распространенного переплетения – полотняного. Представление нитей основы и утка в модели осуществлялось с помощью объемных конечных элементов типа плиты с 8 узлами. Конечно-элементное представление ячейки периодичности ткани полотняного переплетения в исследовании [4] отображено на рисунке 5.



Рис. 5. Конечно-элементное представление ячейки периодичности ткани полотняного переплетения [4]

В данной работе уменьшение размерности задачи достигалось за счет полного игнорирования масштабного фактора, тем самым уменьшая размеры исходной модели для конечно-элементного анализа, и представлением нитей основы и утка в ткани с помощью простых параллелепипедов, которые легко разбиваются на конеч-

ные элементы. При этом такая аппроксимация раппорта ткани является самой грубой по отношению к вышерассмотренным.

Модели, построенные на микроуровне, пригодны для построения моделей нитей, особенно для высокомолекулярных типа стеклянных, базальтовых, углеродных и других, которые представляют собой ровинг, состоящий из тысяч элементарных волокон с диаметром филамент от 7 до 40 мкм. Совершенно очевидно, что такое детальное описание нити невозможно применить к описанию структуры ткани на таком уровне вследствие требования чрезвычайных вычислительных ресурсов. Одним из положительных примеров применения микроуровневого подхода к моделированию строения филаментных нитей является программное решение от ESI Group для прогнозирования свойств нитей при различных видах деформации.

Из выполненного обзора моделей структуры тканей, применяемых для задач механики разрушения и особенно в динамической постановке, можно сделать выводы о том, что:

- с целью повышения точности решения построение моделей структуры тканей различных переплетений лучше делать на мезоуровне;
- высокий порядок систем нелинейных уравнений заставляет авторов создавать упрощенные модели строения ткани с применением различных допущений в аппроксимации нитей основы и утка конечными элементами различных типов;
- даже с принятием упрощающих допущений данные задачи требуют суперкомпьютерных технологий.

Как уже было сказано выше, точность описания геометрической модели структуры ткани будет определять и точность модели ее

разрушения, поэтому имеет смысл проанализировать существующие модели, методики и методы, применяемые для ее построения. Достаточно полный обзор методов проектирования и прогнозирования структуры и свойств однослойных и многослойных тканых полотен представлен в диссертации Л. А. Липатовой [5].

При этом различными авторами используются разные подходы и методы – геометрический, механико-геометрический, энергетический, механико-аналитический, детерминированно-вероятностный. Одна из основных целей анализа, проведенного в этой статье, состоит в определении степени готовности разработанных моделей структур тканей для построения их 3D-моделей или поиске готового программного обеспечения, позволяющего строить геометрические 3D-модели структуры ткани с учетом множества возможных ткацких переплетений и учитывающих наиболее важные структурные параметры.

В исследовании [6] разработана математическая модель строения технических тканей для производства термопластичных композиционных материалов. Модель разработана аналитическим методом, но она применена к конкретной структуре и материалу ткани под торговым названием ТОПАС-2. Модель не реализована в виде программного обеспечения.

Математическая модель строения с учетом нелинейной теории изгиба нитей ткани полотняного переплетения на различных этапах формирования разработана А. П. Гречухиным и П. Н. Рудовским [7]. Модель построена для льняных и углеродных нитей и ограничена только одним видом ткацкого переплетения – полотняным. Также отсутствует программная реализация модели в универсальной постановке.

В работе [8] представлено методическое обеспечение автоматизированного исследования ткани, позволяющее определять параметры ткани по ее компьютерному изображению. Созданы математические модели распределения яркости на полноцветном изображении ткани, позволяющие прогнозировать высоту волны изгиба нитей по значениям яркости в опорных точках нитей на изображении ткани. Полученные результаты позволяют определить некоторые параметры строения ткани, в частности, высоты волн изгиба нитей, которые необходимы для построения геометрической модели ткани. Но это лишь малая часть параметров, характеризующих реальное строение ткани, и определяются в данном исследовании они уже на готовой ткани. Но если решать задачу проектирования совершенно новой, еще не существую-

щей структуры ткани, то необходимо располагать множеством параметров строения будущей ткани на самом начальном уровне ее разработки, а не на завершенном этапе, когда имеется уже готовый тканый продукт. В работе исследованию подвергались плоские изображения только льняной ткани, которые не позволяют построить объемную 3D-модель ткани. Отсутствует программная реализация построения 3D-структуры ткани.

В исследовании [9] разработана система проектирования структуры цельнотканых 3D-преформ. Данная работа направлена на построение сложных 3D-структур с любыми видами нитей и любыми видами переплетений, однако она ориентирована на построение многослойных тканевых структур по технологии 3D-ткачества. Построение однослойных тканей возможно реализовать в ней как частный случай. Большое преимущество данной работы заключается в ее готовой программной реализации в виде современного программного обеспечения ПО «Преформа». Однако для частной задачи построения структур однослойных тканей ее применение считаем избыточным. Кроме того, математический аппарат ПО «Преформа» не учитывает такой важный фактор строения ткани, как фаза ее строения. В модели утки предполагаются всегда прямыми, как это характерно для технологии 3D-ткачества.

Развитию теории формирования и строения ткани на основе нелинейной механики гибких нитей аналитическими методами посвящено исследование [10]. Автором разработана модель строения ткани для полотняного саржевого, сатинового и атласного переплетений с одинаковой линейной плотностью нитей основы и утка. Также разработаны модели структуры ткани с разными линейными плотностями основной и уточной нити, но только для полотняного переплетения. Отсутствует программная реализация разработанных моделей для практического применения.

В работах [11, 12] представлен механико-аналитический метод прогнозирования параметров структуры тканей. На основе разработанного метода построена модель структуры ткани. Модель позволяет рассчитать: силы взаимного давления между основными и уточными нитями в области контактов; длины, прогибы и смятия нитей; фазу строения; толщину структуры; линейное, поверхностное и объемное заполнение нитями; поверхностную и объемную пористость; поверхностную и объемную плотность ткани. Разработанные модели не реализованы в виде программного обеспечения.

Разрабатываются методики проектирования тканей, в том числе и на основе экспериментальных исследований. Так, авторами [13] разработана методика проектирования тканей комбинированных переплетений, в раппорте которых содержатся основные и уточные перекрытия разной длины. В основе методики лежит определение порядка фазы строения ткани как среднего арифметического значения для всех перекрытий в элементах раппорта. Расчет ведется с учетом предельного порядка фазы строения ткани в прокидке с максимальной длиной. Данная методика разработана только для комбинированных переплетений. Преимуществом работы является учет фазы строения ткани, однако программное обеспечение для построения 3D-модели ткани так и не было реализовано.

Поиск программного обеспечения в базе федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный институт промышленной собственности» (ФИПС) для построения модели строения однослойной ткани дал результат в виде одного источника [14], данная программа для ЭВМ напрямую не позволяет строить 3D-геометрию структуры ткани, но предназначена для расчета основных параметров строения однослойной ткани. При этом для расчета параметров строения ткани использован математический пакет MathCad.

Проведенный обзор подходов к моделям структуры ткани позволяет констатировать следующее:

- наиболее простым для построения 3D-модели структуры ткани является геометрический подход;
- для более точного моделирования структуры ткани с учетом смятия нитей их контактного взаимодействия и действия факторов технологического процесса ткачества широко применяются механико-геометрический и другие подходы. Однако данные подходы имеют ограничения по виду нитей, их линейным плотностям, учету или неучету фазового строения ткани, различных видов ткацких переплетений, присутствуют и другие барьеры;
- большинство моделей строения ткани рассматриваются в плоскости, перпендикулярной нитям утка, и не позволяют без доработки моделей получать 3D-модели ткани;
- практически отсутствует реализация разработанных моделей объемных структур однослойных тканей в виде универсального программного обеспечения, позволяющего стро-

ить данные модели для широкого спектра ткацких переплетений с их различными параметрами строения, вида нитей, различных линейных плотностей нитей основы и утка, фазы строения и др.

Наличие программной реализации процесса проектирования новых тканых структур имеет важнейшее значение для отечественной текстильной промышленности, так как может позволить в сокращенные сроки не только обновлять и расширять ассортимент вырабатываемых тканей, но и улучшать их структуру и качество, причем без больших затрат на обновление технологического ткацкого оборудования.

Таким образом, рассмотрены основные подходы к моделированию структуры ткани, которые было бы возможно использовать для проектирования тканых гибких преград.

На основе полученной обзорной информации и выполненных собственных исследований [15] была разработана методика построения 3D геометрической модели структуры однослойных арамидных тканей наиболее перспективных переплетений – полотняного, саржевого, сатинового, атласного, репс, рогожка с варьируемыми параметрами структуры с учетом фазы строения. Методика реализована в виде программного обеспечения в CAD-системе SolidWorks и позволяет строить параметрические 3D-модели широкой номенклатуры переплетений с учетом наиболее важных параметров строения ткани. Реализована интеграция разработанной модели в CAE-системы конечно-элементного анализа с целью прогнозирования баллистических свойств тканей.

ВЫВОДЫ

1. Универсальные 3D-модели структуры однослойных тканей с учетом всех параметров строения и видов переплетений для различных материалов отсутствуют. Разработанные методики и модели структуры однослойных тканей имеют различные ограничения по области их применения.

2. Практически отсутствуют методики и модели структуры однослойной ткани для построения их 3D-изображений, реализованные в виде специализированного программного обеспечения.

3. Разработана методика построения 3D-моделей структуры однослойной ткани, позволяющая строить их для широкого класса ткацких переплетений и учитывающая основные параметры ее строения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Игнатова А. В. Анализ кинетики деформирования и разрушения слоистых тканевых структур с тонкими покрытиями при локальном ударе : дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2021. 145 с.
2. Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric / С. Ha-Minh, A. Imad, T. Kanit, F. Boussu // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013. Vol. 69. P. 32–39.
3. Долганина Н. Ю., Игнатова А. В. Исследование влияния типа переплетения нитей на прочность тканевых преград при локальном ударе // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2013. Т. 13, № 2. С. 95–104.
4. Кожанов Д. А. Моделирование поведения гибких тканых композитов при растяжении : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2017. 117 с.
5. Липатова Л. А. Разработка методов оценки и исследование формовочной способности многослойных композиционных текстильных материалов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 206 с.
6. Математическая модель строения технических тканей для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии / С. Г. Степанов, В. М. Джанпаизова, Ж. У. Мырхалыков, Г. С. Кенжибаева, Б. С. Туракулов // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2020. № 4(388). С. 79–83.
7. Гречухин А. П., Рудовский П. Н. Развитие теории строения и формирования однослойных тканей : монография. Кострома : Костром. гос. ун-т, 2017. 172 с.
8. Сокова Г. Г. Теоретические и практические аспекты автоматизированного анализа и проектирования льняных тканей : дис. ... д-ра техн. наук. Кострома, 2009. 303 с.
9. Киселев А. М., Киселев М. В. Разработка систем проектирования структуры и контроля качества цельнотканых 3D-преформ : монография. Кострома : Костром. гос. ун-т, 2018. 177 с.
10. Степанов С. Г. Развитие теории формирования и строения ткани на основе нелинейной механики гибких нитей : дис. ... д-ра техн. наук. Иваново, 2007. 443 с.
11. Примаченко Б. М. Разработка механико-аналитического метода прогнозирования параметров структуры тканей бытового и технического назначения. Механико-аналитическая модель структуры ткани. Часть 2. Продолжение // *Дизайн. Материалы. Технология*. 2010. № 4(15). С. 72–77.
12. Примаченко Б. М. Разработка методов прогнозирования структуры и эксплуатационных свойств тканей бытового и технического назначения на основе технологических параметров их производства : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2009. 406 с.
13. Федорченко Е. В., Закора О. В., Кирильчук И. Е. Инновационный подход к проектированию тканей комбинированных переплетений с длинными прокидками // *Материалы и технологии*. 2018. № 1(1). С. 28–32.
14. Расчет основных параметров строения однослойной ткани : программа для ЭВМ. № (св-ва): 2016610065. Дата регистрации: 11.01.2016.
15. Киселев М. В., Фарух М. А. Создание пакета баллистической преграды на основе арамидных и углеродных нитей с повышенными защитными свойствами // *Инновационные текстильные технологии. Перспективы развития : тез. докл. IV Всерос. науч. студ. конф. с междунар. участием (23 ноября 2023 г.)*. М. : РГУ им. А. Н. Косыгина, 2023. С. 40–41.

REFERENCES

1. Ignatova A. V. Analysis of the kinetics of deformation and fracture of layered fabric structures with thin coatings under local impact. Cand. techn. sci. dis. Perm, 2021. 145 p. (In Russ.)
2. Ha-Minh C., Imad A., Kanit T., Boussu F. Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013;69:32–39.
3. Dolganina N. Yu., Ignatova A. V. Study of the influence of the type of thread interlacing on the strength of fabric barriers under local impact. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Mashinostroenie* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering]. 2013;13,2:95–104. (In Russ.)
4. Kozhanov D. A. Modeling the behavior of flexible woven composites under tension. Cand. of phys. and math. sci. dis. Nizhny Novgorod, 2017. 117 p. (In Russ.)
5. Lipatova L. A. Development of methods for assessing and studying the formability of multilayer composite textile materials. Cand. tech. sci. dis. Moscow, 2017. 206 p. (In Russ.)
6. Stepanov S. G., Dzhanchpaizova V. M., Myrkhalykov Zh. U., Kenzhibaeva G. S., Turakulov B. S. Mathematical model of the structure of technical fabrics for the production of thermoplastic composite materials using reduced technology. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promysh-*

- lennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2020;4(388):79–83. (In Russ.)
7. Grechukhin A. P., Rudovsky P. N. Development of the theory of structure and formation of single-layer fabrics. Kostroma, Kostroma St. Univ. Publ., 2017. 172 p. (In Russ.)
 8. Sokova G. G. Theoretical and practical aspects of automated analysis and design of linen fabrics. Doct. techn. sci. dis. Kostroma, 2009. 303 p. (In Russ.)
 9. Kiselev A. M., Kiselev M. V. Development of systems for designing the structure and quality control of solid 3D preforms. Kostroma, Kostroma St. Univ. Publ., 2018. 177 p. (In Russ.)
 10. Stepanov S. G. Development of the theory of formation and structure of fabric based on nonlinear mechanics of flexible threads. Doct. techn. sci. dis. Ivanovo, 2007. 443 p. (In Russ.)
 11. Primachenko B. M. Development of a mechanical-analytical method for predicting the structural parameters of household and technical fabrics. Mechanical-analytical model of fabric structure. Continuation. *Dizajn. Materialy. Tekhnologiya* [Design. Materials. Technology]. 2010;4(15):72–77. (In Russ.)
 12. Primachenko B. M. Development of methods for predicting the structure and performance properties of fabrics for household and technical purposes based on the technological parameters of their production Doct. techn. sci. dis. Saint Petersburg, 2009. 406 p. (In Russ.)
 13. Fedorchenko E. V., Zakora O. V., Kirilchuk I. E. Innovative approach to the design of fabrics of combined weaves with long insertions. *Materialy i tekhnologii* [Materials and technologies]. 2018;1(1):28–32. (In Russ.)
 14. Calculation of the main parameters of the structure of a single-layer fabric. Computer program. Registration number (certificate): 2016610065. Date of registration: 11.01.2016.
 15. Kiselev M. V., Farukh M. A. Creation of a ballistic barrier package based on aramid and carbon threads with enhanced protective properties. *Innovatsionnye tekstil'nye tekhnologii. Perspektivy razvitiya* [Innovative textile technologies. Development prospects]. Abstracts of reports of the IV All-Russian scientific student conference with international participation (November 23, 2023). Moscow, Kosygin Russian St. Univ. Publ., 2023. P. 40–41.

Статья поступила в редакцию 02.06.2025

Принята к публикации 09.09.2025