

УДК 687.03:004.89

DOI 10.47367/0021-3497_2025_3_5

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА
ТЕКСТИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА***

**MATHEMATICAL BASIS OF TEXTILE PRODUCT DIGITAL PRODUCTION
USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS**

*М.А. БИМЕНОВ¹, З.А. БИМЕНОВА¹, К.И. ТАДЖИХАНОВА¹, Ш.Э. СЕЙТХАНОВА¹,
М.М. ТУРГАНБЕКОВА²*

*M.A. BIMENOV¹, Z.A. BIMENOVA¹, K.I. TADZHIKHANOVA¹, SH.E. SEITHANOVA¹,
M.M. TURGANBEKOVA²*

¹Шымкентский университет, Республика Казахстан,

²Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан)

¹Shymkent University, Republic of Kazakhstan,

²M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan)

Email: san.mom@inbox.ru

В данной научной статье проводится всесторонний анализ современных методов математического моделирования текстильных материалов для цифрового производства. Исследование фокусируется на решении актуальной проблемы выбора оптимальных подходов к компьютерному представлению тканей с учетом их сложных механических и геометрических характеристик. Авторы предлагают оригинальную многоуровневую систему классификации существующих методик, основанную на трех фундаментальных критериях: природе математического описания (геометрическое/физическое/гибридное), масштабе рассмотрения (макро-/микро-/мультимасштабное) и способе вычислительной реализации. Особое внимание уделяется сравнительному анализу эффективности различных подходов при работе с конкретными типами текстильных материалов – от традиционных хлопковых тканей до современных композитных и "умных" материалов с программируемыми свойствами. В работе детально рассматриваются как классические методы (сети Чебышева, масс-пружинные системы), так и перспективные гибридные технологии, сочетающие физическое моделирование с алгоритмами машинного обучения. Практическая значимость исследования заключается в разработанном авторами алгоритме выбора моделирующего инструментария, который учитывает: тип решаемой проектной задачи, требуемую точность прогнозирования, доступные вычислительные ресурсы и специфические свойства моделируемого материала.

* Исследование выполнено при поддержке гранта МОН РК (проект № AP14872068).

Представленные результаты особенно актуальны для задач виртуального прототипирования одежды, разработки технического текстиля и создания адаптивных материалов для медицины и робототехники.

This scientific article provides a comprehensive analysis of modern mathematical modeling methods for textile materials in digital manufacturing. The research focuses on solving the urgent problem of selecting optimal approaches for computer representation of fabrics, taking into account their complex mechanical and geometric characteristics. The authors propose an original multi-level classification system for existing methods, based on three fundamental criteria: the nature of mathematical description (geometric/physical/hybrid), consideration scale (macro-/micro-/multiscale), and computational implementation method. Special attention is paid to the comparative analysis of the effectiveness of various approaches when working with specific types of textile materials - from traditional cotton fabrics to modern composite and "smart" materials with programmable properties. The work examines in detail both classical methods (Chebyshev nets, mass-spring systems) and promising hybrid technologies combining physical modeling with machine learning algorithms. The practical significance of the research lies in the authors' developed algorithm for selecting modeling tools, which considers: the type of design problem being solved, required prediction accuracy, available computational resources, and specific properties of the simulated material. The presented results are particularly relevant for virtual clothing prototyping tasks, technical textile development, and creation of adaptive materials for medicine and robotics.

Ключевые слова: математическое моделирование, текстильные материалы, виртуальное прототипирование одежды, цифровое производство.

Keywords: mathematical modeling, textile materials, virtual prototyping of clothing, digital manufacturing.

Введение

Современная текстильная промышленность находится на этапе глубокой цифровой трансформации, связанной с необходимостью устойчивого развития, персонализации продукции и оптимизации производственных процессов [1]. По данным Международного энергетического агентства, традиционное текстильное производство ответственно за 10% глобальных выбросов углерода, что актуализирует разработку цифровых альтернатив [2].

Ключевыми технологическими драйверами этой трансформации выступают: математическое моделирование поверхности одежды, позволяющее прогнозировать ее поведение в виртуальной среде до физического производства [3]; искусственный интеллект, обеспечивающий генеративный дизайн и оптимизацию производственных параметров [4]; аддитивные технологии

(3D/4D-печать), открывающие новые возможности для создания интеллектуальных текстильных структур [5].

На основе анализа литературы выделены основные подходы к моделированию текстильных материалов:

1. Геометрические модели. Основаны на дифференциальной геометрии и теории поверхностей. Наиболее распространенные типы:

- сети Чебышева [6] – моделируют не-растяжимые ткани (деним, хлопковые полотна) как ортогональные сети волокон с условием $|r_u|=|r_v|=1$, эффективны для проектирования базовых выкроек, но не учитывают механические деформации;

- линейчатые поверхности [7] – аппроксимируют ткань как набор прямолинейных образующих, применяются для моделирования драпировки жестких материалов (шерсть, некоторые синтетики);

- квад-сетки [8] – дискретные аналоги, подходящие для трикотажа и эластичных материалов за счет учета локальных деформаций.

2. Физико-механические модели. Учитывают реальные механические свойства материалов. К таким моделям относятся следующие:

- модели на основе FEM [9] – точно воспроизводят поведение тканей со сложной механикой (шелк, кружево) путем решения уравнений теории упругости, требуют значительных вычислительных ресурсов;

- дискретные модели масс-пружин [10] – подходят для быстрого моделирования базовых деформаций трикотажа и нетканых материалов;

- модели вязкоупругих сред [11] – применяются для материалов с памятью формы (SMP-полимеры, нитинол).

3. Гибридные модели. Комбинируют преимущества геометрических и физических методов:

- нейросетевые суррогатные модели [12] – обучаются на данных физического моделирования, позволяя быстро прогнозировать поведение новых материалов (графеновые ткани, биотекстиль);

- мультимасштабное моделирование [13] – соединяет микроструктуру ткани с макромеханикой, критически важно для технического текстиля (композитные армирующие материалы).

В данном научном исследовании рассматриваются ключевые вызовы (challenges), связанные с цифровым моделированием текстильных материалов. Современная индустрия сталкивается с рядом сложностей, включая необходимость точного воспроизведения сложных деформаций тканей, учет анизотропии свойств и создание универсальных моделей для "умных" материалов с программируемыми характеристиками [14].

Классификация методов моделирования текстильных поверхностей

Современные методы моделирования текстильных материалов могут быть структурированы в виде многоуровневой классификации (рис. 1), основанной на трех ключевых аспектах:

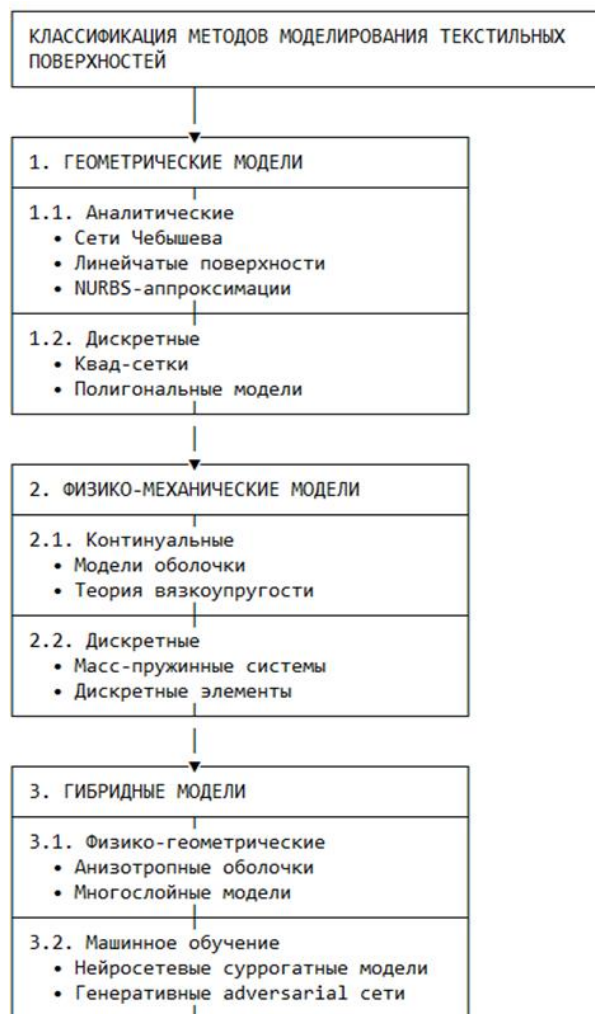


Рис. 1

фундаментальный принцип (геометрический/физический/гибридный);

масштаб рассмотрения (макро-/микро-/мультимасштабный);

вычислительная реализация (аналитическая/численная).

Предложенная систематизация основана на следующих принципах:

1. Фундаментальный.

• Геометрические модели идеально подходят для начальных стадий проектирования, когда требуется быстрое прототипирование формы без учета физических свойств [19].

• Физико-механические модели необходимы для точного прогнозирования поведения материалов. Например, трикотаж и эластичные материалы требуют учета нелинейностей [15]. Расчет поведения технического текстиля с особыми свойствами (композиты) зачастую основан на принципах

использования механики сплошных сред [20].

- Гибридные модели представляют современный тренд, так как комбинируют скорость геометрических методов с точностью физических [16]. Такие методы особенно перспективны для smart-текстиля [17].

2. Масштаб рассмотрения. Предложены следующие уровни:

- макромоделли ($\geq 1 \text{ см}^2$) – для драпировки и крупных складок;
- микромоделли ($\leq 1 \text{ мм}^2$) – для переплетения нитей;
- мультимасштабные модели – для технических тканей [18].

В современном цифровом моделировании текстильных материалов принципиальное значение имеет выбор масштаба рассмотрения, определяющий степень детализации и точности модели. Макромоделли, работающие с областями от 1 см^2 и более, позволяют эффективно анализировать поведение ткани в целом – ее драпировку, образование складок и взаимодействие с поверхностью тела. Такой подход находит широкое применение в задачах виртуальной примерки и проектирования одежды, где важна общая визуализация формы изделия при относительно невысоких вычислительных затратах.

Для более глубокого анализа структуры материала используются микромоделли, рассматривающие участки ткани размером менее 1 мм^2 . Этот уровень детализации необходим при изучении особенностей переплетения нитей, разработке новых тканых и трикотажных структур, а также при моделировании локальных деформаций. Микромоделирование особенно востребовано при создании специализированных текстильных материалов с заданными механическими свойствами.

Наиболее комплексный подход реализуется в мультимасштабных моделях, сочетающих анализ как макроскопического поведения, так и микроструктурных особенностей материала. Такие модели незаменимы при проектировании технического текстиля – композитных материалов, бронезащитных тканей, медицинских имплантов и других высокотехнологичных изделий, где

необходимо учитывать взаимовлияние структурных элементов разного масштаба. Однако следует учитывать, что мультимасштабное моделирование требует значительных вычислительных ресурсов и сложных математических алгоритмов.

Выбор оптимального масштаба моделирования определяется конкретными задачами проектирования. Для большинства случаев массового производства одежды достаточно макромоделей, тогда как разработка инновационных материалов с особыми свойствами требует применения микро- или мультимасштабных моделей. Важным аспектом является баланс между точностью модели и вычислительной эффективностью, что особенно актуально для интерактивных систем виртуальной примерки.

3. Вычислительная реализация. Предложены следующие классы:

- аналитические решения (редки, только для простых случаев);
- численные методы (FEM, DEM, FVM);
- Data-driven подходы (нейросети).

Выбор конкретного подхода определяется компромиссом между требуемой точностью прогнозирования и доступными вычислительными ресурсами. При этом современные тенденции цифровизации текстильной отрасли демонстрируют устойчивый рост интереса к мультимасштабным методам, что связано как с развитием вычислительной техники, так и с усложнением требований к функциональным характеристикам текстильных материалов.

Для сравнения методов предложена десятибалльная шкала. Систематизация предлагаемых оценок применимости методов приведена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Критерий	Геометрические	Физические	Гибридные
Точность	6/10	9/10	8/10
Быстродействие	9/10	4/10	7/10
Учет анизотропии	3/10	8/10	9/10
Сложность реализации	5/10	9/10	7/10
Гибкость	7/10	6/10	9/10

Приведем пример оценки метода чебышевских сеток с помощью предложенных критериев применимости.

Точность: 8/10 (хорошо описывает не растяжимые ткани, но не учитывает сдвиги).

Вычислительная сложность: 6/10 (требует решения нелинейных уравнений).

Гибкость: 7/10 (ограничена поверхностями с низкой гауссовой кривизной).

Интеграция с ИИ: 5/10 (частичная совместимость с предиктивными моделями).

Предлагается алгоритм выбора метода для моделирования свойств материалов в трехмерной среде (рис. 2).

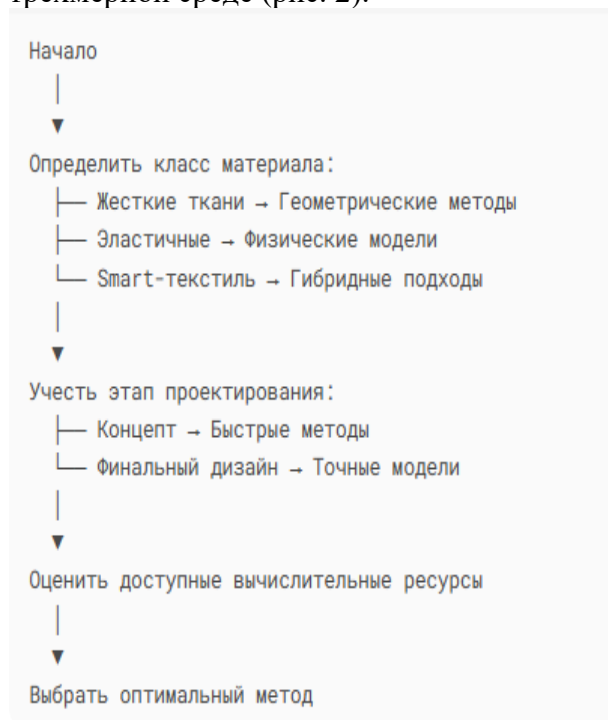


Рис. 2

Для традиционных тканей (хлопок, шерсть) часто достаточно геометрических методов [21]. Специальные материалы (кевларовые ткани, мембраны) требуют физического моделирования [22]. Ресурсоемкие методы (FEM) оправданы только на финальных этапах проектирования тканей [23].

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование демонстрирует фундаментальную роль математического моделирования и искусственного интеллекта в цифровой трансформации текстильного производства. Гибридные под-

ходы, интегрирующие геометрические модели с физико-механическими и методами машинного обучения, показали наибольшую эффективность при моделировании сложного поведения современных текстильных материалов. Эти методы обеспечивают оптимальный баланс между точностью прогнозирования и вычислительной эффективностью.

Перспективные направления будущих исследований включают: разработку адаптивных мультимасштабных моделей для smart-текстиля; создание универсальных алгоритмов, автоматически выбирающих уровень детализации; моделирование материалов с программируемыми свойствами (термо-, фото- и гидроактивных); интеграцию сенсорных сетей в виртуальные модели тканей; совершенствование методов ИИ для текстильного производства; генеративные adversarial сети для автоматического создания текстур и переплетений; нейросетевые суррогатные модели для ускорения физических расчетов; алгоритмы компьютерного зрения для контроля качества на основе микромоделей.

Особое внимание следует уделить созданию открытых стандартов и цифровых платформ, позволяющих объединить усилия исследователей и промышленных предприятий в области цифрового текстильного производства. Решение этих задач потребует междисциплинарного подхода, объединяющего специалистов в области материаловедения, компьютерного моделирования, искусственного интеллекта и текстильных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щигорев Н.А., Рыбаулина И.В. Инновационные материалы. Умный текстиль // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2024. №4. С. 21...28.
2. Обороин М.С., Савельев И.И. Современные достижения в текстильной промышленности // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2024. № 1. С. 17...23.
3. Jiang C. et al. Quad-based isometric mappings and deployable surfaces // ACM Transactions on Graphics. 2020. Vol. 39, № 4. P. 103.
4. Zhang Q. et al. Intelligent 3D lightweight structure fabricated from thin composite sheet via 3D printing // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. P. 223.

5. Шаймерденова Г.С. и др. Использование SMART-технологий в пищевых промышленности // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 2. С. 209...215.
6. Aumann G. A simple algorithm for designing deployable Bézier surfaces // Computer Aided Geometric Design. 2013. Vol. 30, № 7. P. 601...619.
7. Wang K.L., Tan K. Achieving expandability of polygonal surfaces via minimal deformation // The Visual Computer. 2004. Vol. 20, № 9. P. 521...539.
8. Bekualykyzy B.G. et al. Nonlinear system control using feedback with Python-control library // 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies. 2024. P. 164...168.
9. Mahanova Z. et al. Deep residual network for crack detection in historical buildings // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2024. Vol. 15, № 5.
10. Есиркепова А.М. и др. Финансовые аспекты дуального обучения как основы модернизации подготовки кадров для текстильной промышленности // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2017. № 6. С. 78...84.
11. Belessova D. et al. The impact of Scratch on engagement and academic performance of primary school students // Open Education Studies. 2024. Vol. 6, № 1.
12. Монахов В.И. и др. Методы Big Data в системе автоматизированного управления производственными процессами текстильного предприятия с использованием цифровых двойников // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2024. № 2. С. 241...244.
13. Pottmann H. et al. Geometry of multi-layer freeform structures // ACM Transactions on Graphics. 2020. Vol. 39, № 4. P. 1...18.
14. Bickel B. Computational design of functional surfaces // Computer Graphics Forum. 2021. Vol. 40, №2. P. 567...588.
15. Kugler M. Nonlinear continuum mechanics for textile materials // Journal of Elasticity. 2022. Vol. 148, № 1. P. 1...24.
16. Bouaziz S. Real-time dynamic wrinkling of cloth // ACM SIGGRAPH. 2021. P. 1...14.
17. Zhang Y. Deep learning for textile design automation // Nature Materials. 2023. Vol. 22, № 3. P. 256...270.
18. Casati R. Multiscale modeling of woven composites // Composites Science and Technology. 2022. Vol. 230. P. 109764.
19. Sederberg T.W. Computer Aided Geometric Design. 2012. 456 p.
20. Bathe K.J. Finite Element Procedures. 2014. 1037 p.
21. Provot X. Deformation constraints in mass-spring systems // CGI. 1995. P. 147-154.
22. Bridson R. Simulation of clothing with folds // SIGGRAPH. 2003. P. 582...589.
23. Tang M. Deep learning for real-time cloth simulation // ACM TOG. 2020. 39(4).
1. Shchigorets N.A., Rybaulina I.V. Innovative materials. Smart textiles // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2024. No. 4(412). P. 21...28.
2. Oborin M.S., Savelyev I.I. Modern achievements in the textile industry // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2024. № 1(409). P. 17...23.
3. Jiang C. et al. Quad-based isometric mappings and deployable surfaces // ACM Transactions on Graphics. 2020. Vol. 39, № 4. P. 103.
4. Zhang Q. et al. Intelligent 3D lightweight structure fabricated from thin composite sheet via 3D printing // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. P. 223.
5. Shaimerdenova G.S. et al. Use of SMART technologies in food industries // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2020. № 2(386). P. 209...215.
6. Aumann G. A simple algorithm for designing deployable Bézier surfaces // Computer Aided Geometric Design. 2013. Vol. 30, № 7. P. 601...619.
7. Wang K. L., Tan K. Achieving expandability of polygonal surfaces via minimal deformation // The Visual Computer. 2004. Vol. 20, № 9. P. 521...539.
8. Bekualykyzy B.G. et al. Nonlinear system control using feedback with Python-control library // 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies. 2024. P. 164...168.
9. Mahanova Z. et al. Deep residual network for crack detection in historical buildings // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2024. Vol. 15, № 5.
10. Yesirkepova A.M. et al. Financial aspects of dual education as modernization bases for personnel training for textile industry // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2017. Vol. 372, № 6. P. 78...84.
11. Belessova D. et al. The impact of Scratch on engagement and academic performance of primary school students // Open Education Studies. 2024. Vol. 6, № 1.
12. Monakhov V. I. et al. Big Data methods in the system of automated management of production processes at a textile enterprise using digital twins // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2024. № 2. P.210...225.
13. Pottmann H. et al. Geometry of multi-layer freeform structures // ACM Transactions on Graphics. 2020. Vol. 39, № 4. P. 1...18.
14. Bickel B. Computational design of functional surfaces // Computer Graphics Forum. 2021. Vol. 40, №2. P. 567...588.
15. Kugler M. Nonlinear continuum mechanics for textile materials // Journal of Elasticity. 2022. Vol. 148, № 1. P. 1...24.
16. Bouaziz S. Real-time dynamic wrinkling of cloth // ACM SIGGRAPH. 2021. P. 1...14.
17. Zhang Y. Deep learning for textile design automation // Nature Materials. 2023. Vol. 22, № 3. P. 256...270.

18. *Casati R.* Multiscale modeling of woven composites // *Composites Science and Technology*. 2022. Vol. 230. P. 109764.
19. *Sederberg T.W.* *Computer Aided Geometric Design*. 2012. 456 p.
20. *Bathe K.J.* *Finite Element Procedures*. 2014. 1037 p.
21. *Provot X.* Deformation constraints in mass-spring systems // *CGI*. 1995. P. 147...154.

22. *Bridson R.* Simulation of clothing with folds // *SIGGRAPH*. 2003. P. 582...589.

23. *Tang M.* Deep learning for real-time cloth simulation // *ACM TOG*. 2020. 39(4).

Рекомендована кафедрой информационных коммуникационных технологий ЮКУ им. М. Ауэзова г. Шымкент. Поступила 16.09.24.
