

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-93>

УДК 687.1: 620.22

РЯБЧИКОВ МИКОЛА

Луцький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9382-7562>e-mail: mykola.riabchikov@lntu.edu.ua**НАЗАРЧУК ЛЮДМИЛА**

Луцький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9724-5132>e-mail: nlv_29@ukr.net**МЕЛЬНИК ДМИТРО**

Луцький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0007-6298-5027>e-mail: melnyk.developer@gmail.com**КИСІЛЬ СОФІЯ**

Луцький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0001-5040-3516>e-mail: sonya.k49641155@gmail.com

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ОБРОБКИ ТЕКСТИЛЬНИХ ВИРОБІВ 3D-ФОРМ

У статті розглянуто проблему надання текстильним виробам об'ємно-просторової форми з урахуванням вимог до зручності, естетики та експлуатаційних характеристик. Проаналізовано традиційні методи формоутворення — виконання виточок і застосування волого-теплової обробки (ВТО), визначено їхні переваги та обмеження, а також окреслено перспективи комбінованого використання. Виконано огляд сучасних досліджень у сфері 3D-сканування, чисельного моделювання та інверсних методів оптимізації конструкцій. Для прикладу побудовано математичну модель поверхні плечової зони людини методом найменших квадратів, що продемонструвала високу точність апроксимації ($R^2 \approx 0,90$). Експериментально встановлено залежність параметрів деформації від типу матеріалу, наявності швів і режимів ВТО. Показано можливості інверсного підходу до визначення температурних режимів, необхідних для досягнення заданої 3D-форми. Отримані результати створюють підґрунтя для розроблення інтегрованих технологій конструювання одягу, які поєднують геометричне моделювання, фізико-механічні характеристики матеріалів та оптимізаційні алгоритми.

Ключові слова: формоутворення, 3D-сканування, волого-теплова обробка, інверсне моделювання, конструювання одягу, текстильні матеріали.

RIABCHYKOV MYKOLA, NAZARCHUK LIUDMYLA,**MELNYK DMYTRO, KYSIL SOFIIA**

Luts'k National Technical University

SELECTION OF RATIONAL TECHNOLOGICAL SCHEMES FOR PROCESSING TEXTILE PRODUCTS OF 3D FORMS

The article addresses the problem of shaping textile products into complex three-dimensional forms, which is a crucial factor for ensuring comfort, aesthetics, and durability of modern garments. Traditional approaches to form-giving, such as the use of darts or wet-heat treatment (WHT), have clear advantages and limitations. Darts guarantee high accuracy of shaping but may negatively affect the visual appearance and complicate construction, while WHT allows seamless shaping but strongly depends on the thermomechanical properties of fabrics and requires scientifically justified technological regimes. Therefore, a combined or alternative application of these methods is considered a promising direction for the improvement of garment design and manufacturing technologies. A review of recent studies highlights the rapid development of 3D body/product scanning systems and numerical modeling techniques that support accurate digital representation of textile surfaces. Based on 3D data, different strategies of flattening, segmentation, and inverse modeling are discussed, including the integration of machine learning for automated prediction of patterns and seams. At the same time, the influence of mechanical fabric parameters (bending, stretching, draping) and WHT regimes on the final form stability is emphasized. Experimental investigations involved textile samples of various structures (cotton, knits, elastomer-containing fabrics), subjected to WHT under different temperature, time, and tension conditions. Additionally, sewn and seamless specimens were tested to evaluate the effect of constructive elements. A quadratic least-squares model of the shoulder zone surface was built, explaining about 90% of the data variance, which demonstrates its applicability for predicting garment geometry. The results confirm the feasibility of inverse approaches, where the required temperature distribution is derived to achieve predetermined deformations and three-dimensional geometry. The proposed methodology combines 3D scanning, experimental tests, and numerical optimization, creating a solid foundation for integrated garment design technologies.

Keywords: form-giving, 3D scanning, wet-heat treatment, inverse modeling, garment design, textile materials.

Стаття надійшла до редакції / Received 14.08.2025

Прийнята до друку / Accepted 16.09.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У сучасному виробництві одягу особливе значення має надання текстильним виробам необхідної просторової форми, що безпосередньо впливає на їхню зручність, естетичність та експлуатаційні властивості. Традиційно цього досягають за допомогою виконання виточок або шляхом деформації матеріалу у процесі волого-теплової обробки (ВТО). Кожен із цих методів має свої переваги

й обмеження: виточки забезпечують точність формоутворення, проте можуть погіршувати зовнішній вигляд та ускладнювати конструкцію; деформування під час ВТО дозволяє уникати додаткових швів, але залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу й потребує технологічно обґрунтованого режиму обробки.

У зв'язку з цим постає потреба у поглибленому вивченні можливостей комбінованого чи альтернативного застосування цих засобів з метою вдосконалення технологій конструювання та оздоблення одягу.

Проблема полягає в пошуку оптимальних способів надання об'ємно-просторової форми текстильним виробам із урахуванням вимог до якості, економічності та збереження експлуатаційних характеристик. Важливим завданням є визначення умов, за яких кожен із методів формоутворення (виточки чи ВТО) є найбільш ефективним, а також розроблення рекомендацій для їхнього поєднання у виробничій практиці.

Дослідження у цьому напрямі пов'язані з низкою актуальних наукових і практичних завдань легкої промисловості:

- розвиток методів конструювання одягу з урахуванням нових властивостей текстильних матеріалів;
- підвищення ергономічності та естетичної привабливості виробів;
- оптимізація технологічних процесів виготовлення одягу;
- пошук ресурсозберігаючих рішень у швейному виробництві.

Таким чином, проблема формоутворення текстильних виробів на сучасному етапі має міждисциплінарний характер і потребує наукового обґрунтування для створення ефективних та інноваційних технологій.

Аналіз досліджень та публікацій

3D-сканування тіла/виробу стало стандартним інструментом для зняття форми й вимірів — огляди показують швидкий розвиток апаратних (лазер, structured light, фотограмметрія) і програмних рішень (реконструкція, параметричні моделі) [1].

На основі 3D-даних розробляють кілька підходів до отримання плоских розгортки: пряме «поверхневе» розгортання/флаттенінг трикутної сітки, сегментація на панелі + оптимізація швів, а також методи на основі інверсного моделювання (симуляція → зворотній розрахунок). Існують як класичні академічні алгоритми, так і останні роботи, що застосовують ML/AI для автоматизації [2].

Динамічна поведінка тканини (драпування, деформація під власною вагою/контактом) моделюється через фізично-засновані підходи (FEM, mass-spring), але точність сильно залежить від коректних механічних характеристик тканини та параметрів симуляції [3]. Дослідження ВТО показують, що результати залежать від волокна, структури тканини (уток/петля), наявності еластомеру, температури, вологості та часу — і для різних класів тканин існують різні оптимальні режими. Проте кількість систематичних робіт, які пов'язують конкретні ВТО-режими з кінцевою «формостійкістю» складних 3D-форм (наприклад, плечова зона, складчасті деталі), обмежена [4].

Основні відомі підходи можна розділити на методи вимірювання просторових форм, методи побудови конструкції, методи визначення параметрів обробки.

Метод 3D-сканування дає числові величини (обхвати, виступи), які використовуються для підлаштування традиційних блоків (pattern blocks). Це підхід швидкий і практичний для індустрії, але обмежений, коли потрібна складна топологія.

Методи зворотного дизайну визначають формулювання задачі як оптимізації: знайти 2D-ділянки і шви, які при зшиванні й деформації дають цільову 3D-поверхню. Це потребує фізично точних моделей тканини і потужних чисельних методів [5].

Data-driven / ML підходи — навчання мереж на парах (3D форма ↔ 2D розгортка) або на синтетичних симуляціях; дозволяють швидко прогнозувати шви/розгортки для відомих категорій, але погано узагальнюються на нові матеріали або незвичні конструкції [6].

З результатів дослідження стану питання можна зробити наступні висновки.

Якість 3D-знімка та проста обробка (згладжування, заповнення дірок, сегментація) критично впливають на подальшу розгортку; є досить розвинені методи автоматичної сегментації і параметричного моделювання тіла [7].

Зв'язок між механічними константами тканини (згин, зминання, розтягування) і візуальною якістю драпу показаний у багатьох роботах; симулятори дають корисні інсайти для дизайн ітерацій [8].

Для типових трикотажних або синтетичних матеріалів існують емпіричні рекомендації температури й часу температурної витримки, але вони часто даються як таблиці для простих тестів (полотна), а не для складних тривимірних форм. Більшість досліджень по механізмах форми у складних 3D-елементах фіксації розглядає плоскі зразки; механізм фіксації в областях зі складною кривиною (плечі, груди, комір) — погано вивчений. Не ясно, як локальні напруження та контакт із підкладом/манекеном впливають на остаточну форму після ВТО [9].

Необхідна Модель, що прогнозує постійну пластичну деформацію після ВТО. Наразі існують переважно емпіричні таблиці; недостатньо параметризованих моделей для інверсного пошуку режимів

[10]. Потрібні Інтегровані експериментально-чисельні дослідження, які комбінують 3D-сканування, механічні тестування, контрольовані ВТО-експерименти на репрезентативних 3D-деталях.

Актуальною є розробка зворотних/інверсних алгоритмів. Задача з визначення 2D-потоків (швів/контурів) і ВТО-режимів для забезпечення потрібної 3D-форми вирішується через інверсну оптимізацію з фізичною моделлю тканини

Формулювання цілей статті

Мета роботи - визначити залежність між 2D-розгортками (патернами), конструктивними швами й режимами ВТО та кінцевою 3D-формою виробу; отримати кількісні моделі/метрики для прогнозування формостійкості та розробити рекомендації щодо побудови точних розгорток і параметрів ВТО.

Виклад основного матеріалу

Об'єктом дослідження виступають текстильні зразки різної природи (бавовняні тканини, трикотажні полотна без та з вмістом еластану), які відрізняються структурною анізотропією та термопластичними властивостями. Зразки піддавалися волого-тепловій обробці (ВТО) у різних режимах (температура, час, кількість циклів), із попереднім закріпленням на формоутворювальних поверхнях. Для оцінки впливу конструктивних факторів додатково виготовлялися зразки зі швами та контрольні зразки без швів.

Дослідження проводилося за факторним планом із такими змінними: тип матеріалу, конструктивна конфігурація (з/без швів), режим ВТО (температура, час), попереднє натягнення та кількість циклів обробки. Для кожної комбінації виконувалося не менше трьох реплік, що дозволило застосувати дисперсійний аналіз для визначення статистично значущих факторів.

Вибір зразків та геометрії виконувався за наступними правилами.

Плоскі зразки (control): прямокутні полотна 200×300 мм — для базових механічних тестів і ВТО таблиць усадки.

3D-деталі - «Плечова» деталь: модель плечової частини сорочки/блузи (реальна 3D-форма з характерними кривинами).

Зразки з швами: ті ж 3D-деталі, зшиті звичайними швами (типові нитки, натяг нитки стандартизований).

Для визначення теоретичних 2D-розгорток 3D-форм застосовувалися сучасні алгоритми розгортки трикутних сіток, зокрема кутова параметризація [3].

Ці методи дозволили отримати кількісні оцінки спотворень при переході від 3D-форми до 2D-розгортки, що зіставлялися з експериментальними результатами.

Протокол і обладнання для 3D-сканування включали structured-light 3D-сканер або багатокамерна фотограмметрична установка; точність бажано ≤ 0.5 мм для локальних відхилень. Для дрібних деталей — лазерний сканер.

В результаті тривимірного сканування тіла реальної людини були одержані поверхні, показані на рис.1.

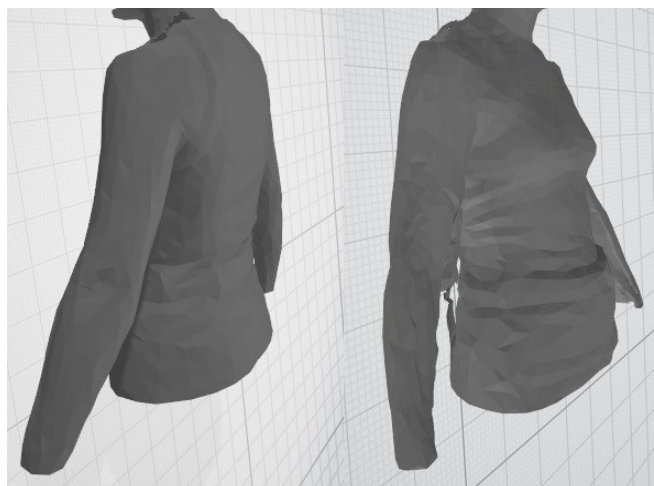


Рис. 1. 3D скановані поверхні тіла людини

Побудова розгортки вимагає конкретних координат точок. Для цього поверхня перетворюється у мережу, складену з трикутних елементів. Кожен трикутний елемент може бути описаний трьома координатами $\{x, y, z\}$ (рис.2)

Основна властивість трикутника, як геометричної фігури визначає повну його інформацію за трьома довжинами сторін. У якості першого кроку аналізувалась складна поверхня плечової зони фігури людини. Рисунок 3 демонструє триангуляційну мережу плечової зони, що складається з 18 елементів і має у своєму складі 16 вузлових точок.

Для даного випадку є тривимірні координати шістнадцяти точок. Необхідно побудувати рівняння поверхні, яка найближчим чином наближається до цих точок.

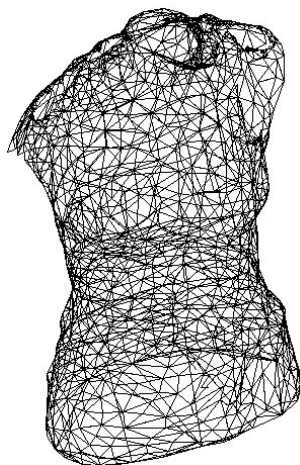


Рис. 2. Мережева модель тривимірної об'єкту, складена з трикутних елементів

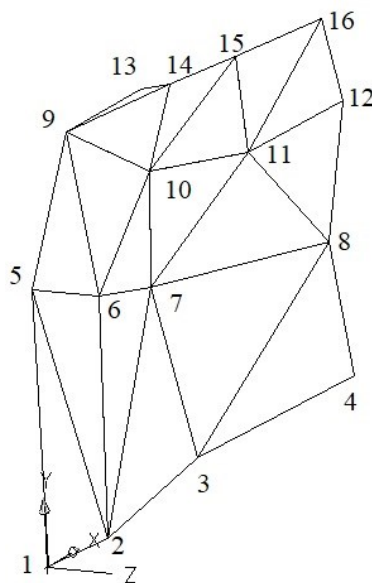


Рис. 3. Триангуляційна мережа плечової зони

Найпростіший і надійний спосіб наблизити поверхню під набір точок — метод найменших квадратів (МНК) для параметричної моделі $z=f(x,y)$. Нижче — коротка методика і розрахунок на ваших 16 точках.

У нашому випадку зручно брати поліном по x, y . Для більшості прикладних задач достатній квадратичний поліном у вигляді

$$z=a+b \cdot x+c \cdot y+d \cdot x^2+e \cdot x \cdot y+f \cdot y^2. \quad (1)$$

При формуванні дизайн матриці для кожної точки (x_i, y_i, z_i) створюється рядок $[1, x_i, y_i, x_i^2, x_i y_i, y_i^2]$. Всі 16 рядків збираються у матрицю A і вектор спостережень z .

Для оцінювання коефіцієнтів розв'язується надлишкова система в сенсі МНК через вирази

$$p=[a,b,c,d,e,f]^T - \arg \min_p \|Ap-z\|^2. \quad (2)$$

Оцінка якості відбувається при обчисленні суми квадратів залишків. Для 16 наданих точок МНК-оцінка квадратичної поверхні дає:

$$z=0,04905-0,267175x-0,355194y+0,00284221x^2-3,983 \cdot 10^{-6}xy+0,00738824y^2. \quad (3)$$

Якість наближення на цих точках $R^2 \approx 0,902$, модель пояснює 90% варіації z . Найменший за модулем залишок $\approx 2,19$.

Одержана поверхня має вигляд Рис.4.

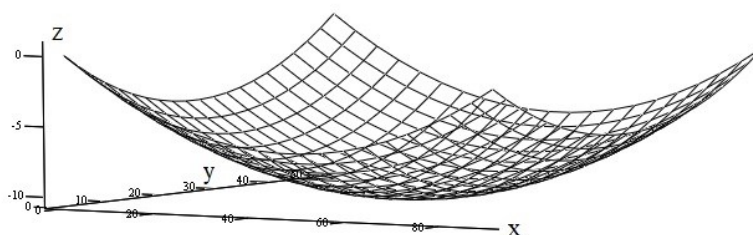


Рис. 4. Інтерполяційна поверхня мережі

Зокрема, матриця координат для рівномірної мережі може бути записана, як

$$Z = \begin{pmatrix} 0,049 & -3,854 & -3,487 & 1,151 \\ -5,408 & -9,313 & -8,948 & -4,312 \\ -5,749 & -9,657 & -9,293 & -4,66 \\ -0,975 & -4,884 & -4,523 & 0,109 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Одержані координати дозволяють знайти довжини сторін трикутних елементів і побудувати їх на площині, що визначає розгортку просторового елементу і може бути основою для розробки конструкції (Рис.5)

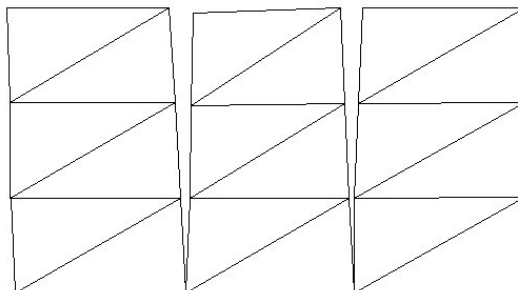


Рис. 5. Розгортка криволінійної тривимірної поверхні

Визначені розриви між елементами можуть визначати необхідні виточки на виробі.

Інший підхід до формування тривимірних текстильних поверхонь може базуватися на термомеханічних характеристиках текстильних матеріалів. При досягненні певної температури тканина переходить в високо еластичне становище, необхідне для деформування. Матеріал при цьому повинен бути навантажений, а відносна деформація визначається залежністю [5].

$$e = e_0 + \lambda \cdot T. \quad (5)$$

В нашому випадку необхідно розв'язувати обернену задачу, тобто для заданого рівня деформацій визначити розподілення температур. При розв'язанні інверсійної задачі визначається розподілення температур, що забезпечує визначену матрицю деформацій (Рис.6)

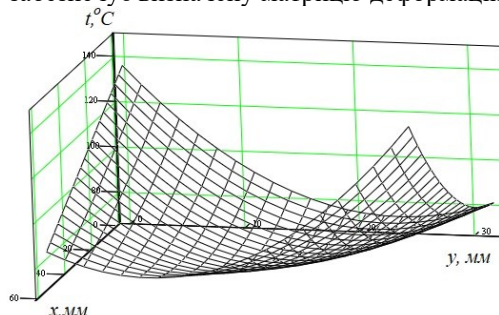


Рис. 6. Розподілення температур для створення заданої тривимірної форми

Слід відзначити, що витрати текстильних матеріалів у випадку температурного деформування будуть меншими. Також зменшується час на виготовлення деталі. Витрати енергії можуть збільшитися у зв'язку з необхідністю нагрівання. Найбільш раціональні методи обробки слід вибирати при розв'язанні оптимізаційної задачі, що визначає екстремум цільової функції (мінімізація витрат або максимізація ефективності).

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У ході дослідження було встановлено, що традиційні методи формоутворення текстильних виробів (виточки та ВТО) мають як переваги, так і обмеження, а їхнє комбіноване застосування відкриває можливості для підвищення якості та функціональності одягу. Використання 3D-сканування й алгоритмів розгортки дозволяє кількісно оцінювати просторові параметри текстильних деталей, визначати спотворення при переході від 3D-геометрії до 2D-розгортки та зіставляти їх із результатами експериментальних досліджень. Побудована математична модель поверхні плечової зони методом найменших квадратів відображає закономірності формоутворення та пояснює понад 90% варіації дослідних даних, що підтверджує її придатність для прогнозування. Проведений аналіз впливу режимів ВТО на структурні та геометричні характеристики матеріалів показав суттєву залежність результатів від типу тканини, наявності швів і параметрів обробки. Застосування інверсних методів дає змогу визначати необхідний розподіл температур для забезпечення заданих деформацій, що створює основу для раціонального керування процесом формоутворення.

Таким чином, результати роботи підтверджують, що поєднання чисельних методів (3D-сканування, моделювання поверхонь, інверсна оптимізація) з експериментальними дослідженнями ВТО є ефективним підходом до вирішення задач сучасного конструювання одягу.

Перспективи подальших досліджень визначають вивчення ширшого спектра текстильних матеріалів, у тому числі новітніх композитних та функціональних тканин, удосконалення моделей. створення багатофакторних моделей, що враховують не лише геометричні, а й реологічні властивості матеріалів, інтеграцію ML/AI-підходів: розробку алгоритмів прогнозування оптимальних режимів ВТО та побудови розгортки для складних форм, оптимізаційні дослідження: розроблення методик багатокритеріальної оптимізації, що враховують якість, економічність, енергоспоживання та ергономічність кінцевих виробів.

Література

1. Garavaso D., Masi F., Musoni ., Castellani U. Point cloud segmentation for 3D Clothed Human Layering.// Computers & Graphics. – 2025. – Volume 132. – 104393. – <https://doi.org/10.1016/j.cag.2025.104393>.
2. Riabchykov M., Mytsa V., Bondarenko M., Nikulina A., Bondarenko, S. Formation of complex 3d surfaces scans for garment CAD.// Vlakna a Textil. – 2023. – 30(3). – p. 13-18. – <https://doi.org/10.15240/tul/008/2023-3-002>.
3. Mytsa V., Riabchykov M., Popova T., Nikulina A. Development of textile structures using 3D prototyping technologies. // Technology Audit and Production Reserves. – 2025. – 2(3(82)). – p.18–23. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.327068>.
4. Wu T., Sh, X.L., Liu W.D. High Thermoelectric Performance and Flexibility in Rationally Treated PEDOT:PSS Fiber Bundles. // Advanced Fiber Materials. – 2024. –Vol.6. –p. 607–618. <https://doi.org/10.1007/s42765-024-00374-z>.
5. Riabchykov M., Vilkov S., Nechipor, S., Popova, T. Two-dimensional studies of thermomechanical properties of textile materials for 3D formation. //Vlakna a Textil. -2018.-25(2). - p. 87-92.
6. Sun Y., Hao Z., Wang Z., Jin J., Ye Q., Lyu Y. Deep learning for 3D garment generation: A review. // Textile Research Journal. – 2025. – 0(0). <https://doi.org/10.1177/00405175251335188>.
7. Zhi-Quan C., Yin C., Ralph R.M., Tong W., Zhan S. Parametric modeling of 3D human body shape—A survey.// Computers & Graphics. – 2018. –Vol.71. – p.88-100. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2017.11.008>.
8. Buyukaslan E.K., Jevšnik F., Jevšnik S. Drapе simulation and subjective assessment of virtual drape. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.- 2017. – 254. – 162002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/254/16/162002>.
9. Miraduzzaman C., Taosif A., Rony M., Raihana Z., Raihan S., Kamrul H.B., Gazi F.I. A feasibility study to analyze the behavior of heat settings on the cleaner production of knitted fabrics // Cleaner Engineering and Technology. – 2022. –Vol.7. – 100429. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100429>.
10. Pannu S., Ahirwar M., Jamdagni R. Role of heat setting and finishing treatment on mechanical properties and hand behavior of stretch fabric. // Journal of Textile Engineering and Fashion Technol. – 2020. -6(5). - p.169-177. <https://doi.org/10.15406/jteft.2020.06.00247>.

References

1. Garavaso D., Masi F., Musoni ., Castellani U. Point cloud segmentation for 3D Clothed Human Layering.// Computers & Graphics. – 2025. – Volume 132. – 104393. – <https://doi.org/10.1016/j.cag.2025.104393>.
2. Riabchykov M., Mytsa V., Bondarenko M., Nikulina A., Bondarenko, S. Formation of complex 3d surfaces scans for garment CAD.// Vlakna a Textil. – 2023. – 30(3). – p. 13-18. – <https://doi.org/10.15240/tul/008/2023-3-002>.
3. Mytsa V., Riabchykov M., Popova T., Nikulina A. Development of textile structures using 3D prototyping technologies. // Technology Audit and Production Reserves. – 2025. – 2(3(82)). – p.18–23. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.327068>.
4. Wu T., Sh, X.L., Liu W.D. High Thermoelectric Performance and Flexibility in Rationally Treated PEDOT:PSS Fiber Bundles. // Advanced Fiber Materials. – 2024. –Vol.6. –p. 607–618. <https://doi.org/10.1007/s42765-024-00374-z>.
5. Riabchykov M., Vilkov S., Nechipor, S., Popova, T. Two-dimensional studies of thermomechanical properties of textile materials for 3D formation. //Vlakna a Textil. -2018.-25(2). - p. 87-92.
6. Sun Y., Hao Z., Wang Z., Jin J., Ye Q., Lyu Y. Deep learning for 3D garment generation: A review. // Textile Research Journal. – 2025. – 0(0). <https://doi.org/10.1177/00405175251335188>.
7. Zhi-Quan C., Yin C., Ralph R.M., Tong W., Zhan S. Parametric modeling of 3D human body shape—A survey.// Computers & Graphics. – 2018. –Vol.71. – p.88-100. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2017.11.008>.
8. Buyukaslan E.K., Jevšnik F., Jevšnik S. Drapе simulation and subjective assessment of virtual drape. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.- 2017. – 254. – 162002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/254/16/162002>.
9. Miraduzzaman C., Taosif A., Rony M., Raihana Z., Raihan S., Kamrul H.B., Gazi F.I. A feasibility study to analyze the behavior of heat settings on the cleaner production of knitted fabrics // Cleaner Engineering and Technology. – 2022. –Vol.7. – 100429. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100429>.
10. Pannu S., Ahirwar M., Jamdagni R. Role of heat setting and finishing treatment on mechanical properties and hand behavior of stretch fabric. // Journal of Textile Engineering and Fashion Technol. – 2020. -6(5). - p.169-177. <https://doi.org/10.15406/jteft.2020.06.00247>.