

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.3.6>

УДК 677.075.3:
620.17

БОБРОВА С. Ю., ЄЛІНА Т. В., ГАЛАВСЬКА Л. Є.,
ЩЕРБАНЬ В. Ю., КОЛИСКО О. З.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

КАРКАСНА МОДЕЛЬ РОЗТЯГУВАННЯ КУЛІРНОГО ТРИКОТАЖУ ВЗДОВЖ ПЕТЕЛЬНИХ РЯДІВ

Мета. Метою даного дослідження є розробка математичного забезпечення процесу трансформування каркасної моделі кулірного трикотажу під дією розтягуючих зусиль, орієнтованих вздовж петельних рядів, для подальшого тривимірного моделювання його структури.

Методика. У процесі дослідження використано методи теоретичного аналізу та синтезу, основні положення теорії в'язання, методи геометричного моделювання та параметризації.

Результати. Урахування деформування структури трикотажу при експлуатації одягу є одним з визначальних факторів забезпечення якості проектних рішень. При розтягуванні кулірного трикотажу вздовж петельних рядів відбувається зміна конфігурації його окремих ділянок, а також зміна поперечних розмірів самої нитки внаслідок силової взаємодії між суміжними елементами структури. Для моделювання поведінки трикотажу під дією розтягуючих зусиль пропонується використовувати комплексну модель деформування трикотажу, частиною якої є запропонована каркасна модель одновісного розтягування. У роботі представлено алгоритм побудови каркасної моделі розтягнення зразка трикотажу вздовж лінії петельного ряду. Основою для алгоритму є набір вихідних даних, що включає петельний крок та висоту петельного ряду в умовно-рівноважному стані, відносне видовження зразка на момент моделювання, кількість петельних стовпчиків та рядів на ділянці зразка, коефіцієнт звуження петельних рядів.

Наукова новизна. У роботі досліджено особливості трансформування структури трикотажу у процесі розтягування вздовж петельних рядів та запропоновано алгоритмічне та математичне забезпечення для автоматизованої побудови сітки-каркасу у контексті тривимірного моделювання, що є необхідним для забезпечення можливості відображення динаміки деформування трикотажу під дією розтягуючих зусиль.

Практична значимість. Каркасна модель деформування трикотажу та запропонований у роботі алгоритм побудови сітки-каркасу формують основу для визначення координат характерних точок елементів структури трикотажу у стані одновісного розтягування для побудови тривимірної моделі нитки у структурі деформованого трикотажу.

Ключові слова: кулірний трикотаж; моделювання деформацій; петельний ряд; каркасна модель; одновісне розтягування; процес деформування.

Вступ. Незважаючи на те, що історія одягу налічує багато століть, саме за останні 100 років ми стали свідками великого вибуху у створенні нових технологій виготовлення текстильних матеріалів та виробів з них. У різних ситуаціях одяг повинен виконувати функції захисту від спеки, холоду, радіоактивних впливів, виробничих та спортивних травм, полум'я, вогнепальної та холодної зброї. Вчені постійно працюють над проектуванням та створенням нових матеріалів з різними функціональними властивостями. Хоча відповідність призначенню є визначальним фактором високоякісного одягу, він також має бути зручним, тобто має бути розроблений з урахуванням вимог комфорту та практичності. Конструктивні особливості готових виробів з трикотажу визначаються насамперед видом використовуваної сировини та структурою переплетення, оскільки їх особливістю є значно вища розтяжність та еластичність порівняно з одягом з тканин. Тому врахування особливостей розтягування трикотажу при експлуатації одягу різного призначення є одним з визначальних факторів, що є надзвичайно важливим при проектуванні нових моделей. Застосування при цьому сучасних автоматизованих систем тривимірного моделювання дає можливість не тільки оцінити зовнішній вигляд, найбільш наближений до реальності, до початку виробництва, але й

моделювати поведінку трикотажу, а при введенні фізико-механічних характеристик сировини, одержувати інформацію про інші властивості готового виробу.

Особливості фізико-механічних процесів та властивостей текстильних матеріалів насамперед можна розглядати, використовуючи програмно-аналітичні комплекси, що дають можливість описати об'єкт проектування шляхом тривимірного моделювання та симуляції. Більшість відомих моделей трикотажу, що існують, описують його структуру в умовно-рівноважному стані. Але у моделюванні слід враховувати той факт, що при експлуатаційних навантаженнях розташування елементів структури трикотажу значно змінюється, адже трикотаж, порівняно з іншими текстильними матеріалами, має легкорухому структуру.

Процеси деформування трикотажу відображені у ряді робіт відомих вчених О.І. Коблякова [1], І.І. Шалова та Л.О. Кудрявіна [2], О.І. Далідовича [3] та ін. Визначення параметрів структури трикотажу з використанням теорії гнучких пружних стержнів розглядалася у роботах Г. Ліфа [4], О.В. Труєвцева [5], В.П. Щербакова та Н.С. Скуланової [6]. Встановлення зв'язку між геометричними параметрами структури трикотажу та його фізико-механічними властивостями є складною багатокомпонентною задачею і для її вирішення застосовуються різні підходи. Дослідження фізичної основи деформаційних процесів трикотажу та їх графічного відображення, що проводяться останнім часом у сфері комп'ютерних наук та технологій [7–9] дозволяють говорити про високий рівень візуальної подібності полігональних моделей. Перехід від вузлів полігональної поверхні виробу до побудови моделей елементів з деталізацією на рівні нитки з урахуванням їхнього деформаційного стану [7] формує основу ефективних алгоритмів візуалізації деформаційних процесів трикотажу. Метод моделювання візерункових переплетень запропоновано у роботі [8]. Автори роботи [9] досліджують способи моделювання сферичної деформації трикотажу переплетення ластик 1x1, виготовленого з введенням утокових ниток, розташованих у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Сучасні наукові розробки в текстильній галузі поєднують знання ряду суміжних наук – фізики та комп'ютерних технологій. Слід зауважити, що незважаючи на високий рівень сучасних технічних та програмних засобів, інтелектуальний людський потенціал на сьогодні залишається одним з найвагоміших факторів для впровадження нових технологій. Опис складної внутрішньої структури текстильних матеріалів з особливостями кожного вхідного елементу з певними геометричними і фізичними характеристиками, потребує значних ресурсів часу та технічних можливостей. З одного боку, детальний опис геометрії ниток у структурі трикотажу надає можливість точного автоматичного визначення їх лінійних розмірів і розподілу об'єму поліфазної гетерогенної суміші, якою є трикотажний матеріал, між твердою та газовою фазами [10]. З іншого боку, будь-яке ускладнення геометрії призводить до значного збільшення розрахункового навантаження на систему. Відомо про застосування методу гомогенізації, де модель, що містить компоненти з різними властивостями (нитка та повітря), замінюють умовно-однорідною моделлю, фізичні характеристики якої співпадають з характеристиками реального матеріалу. Такий метод дозволяє також створити модель певного елементарного об'єму, наприклад, однієї петлі, з деталізацією на рівні ниток, визначити його фізичні характеристики з урахуванням різномірності компонентів, та передати отриманий показник в модель більш високого рівня, яка репрезентує об'єм трикотажу як тривимірного об'єкту порівняно простої форми з визначеними лінійними розмірами та гомогенізовані (умовно-однорідні) фізичні властивості [11]. Існують також підходи до тривимірного моделювання деформацій трикотажу [12] з урахуванням зміщення точок контакту ниток, що дозволяє описати динаміку деформації на рівні пряжі. Авторами статті [13] представлено теоретичну модель, засновану на теорії пружності, яку використовують для прогнозування властивостей при розтягуванні трикотажних полотен переплетення гладь,

виготовлених зі скловолокна. У результаті експериментальних досліджень було знайдено достатньо високу відповідність між теоретичними та емпіричними значеннями. Такий підхід може призвести до зменшення кількості руйнівних випробувань, а отже, буде більш ефективним при використанні ресурсів. Ця модель також може бути застосована для прогнозування властивостей як при одновісному, так і при двовісному розтягуванні трикотажних полотен.

У роботі [14] досліджено балістичні характеристики та створено 3D та 2D моделі тканих полотен з параарамідних ниток для вивчення ефекту Z-деформацій з метою досягнення ефективного балістичного захисту при малій вазі. Встановлено, що при попаданні снаряду у тканинній панелі зі з'єднувальними нитками Z-основи, вони більш здатні перетворювати кінетичну енергію удару снаряда в енергію пружної деформації, що вказує на більшу участь з'єднувальних ниток в поглинанні енергії 3D тканин. Таким чином, структура 3D полотна більш ефективно буде поглинати енергію та мати кращу стійкість до проникнення. У роботі [15] автори досліджують механічні властивості кулірного трикотажу утокових переплетень. Механічна поведінка трикотажних полотен моделюється з використанням макро- та мезомасштабних моделей методом скінченних елементів (FEM). Незважаючи на значні досягнення у сфері тривимірного моделювання структури трикотажу, питання удосконалення методики моделювання деформацій трикотажу залишається відкритим. У роботі [16] запропоновано методику побудови каркасної моделі трикотажу, що знаходиться у стані одновісного розтягу, орієнтованого вздовж петельних стовпчиків. Однак, характер деформування петельної структури вздовж петельних стовпчиків і рядів суттєво відрізняється та потребує окремого вивчення.

Постановка завдання. На теперішній час характерною тенденцією у проектуванні об'єктів промисловості та прогнозуванні їх властивостей є використання універсальних автоматизованих програмно-аналітичних комплексів, які належать до найбільш складних сучасних програмних систем, включаючи засоби комп'ютерної графіки, математичного моделювання, програмування мовами високого рівня, системи управління базами даних та ін. Пошук алгоритмів використання таких систем у прогнозуванні показників комфортності текстильного одягу шляхом симуляції гідрогазодинамічних процесів, що мають місце у підодяговому просторі та у навколишньому середовищі є надзвичайно актуальною задачею у сфері текстильних технологій. Такі характеристики трикотажу як гігроскопічність, повітропроникність, теплозахисні властивості, залежать від стану деформування кожного елемента структури в межах досліджуваного фрагменту трикотажного полотна, що в свою чергу залежать від конфігурації нитки та параметрів структури трикотажу. Питання моделювання поведінки трикотажу під дією розтягуючих зусиль складно реалізувати за допомогою універсальних систем інженерного аналізу без застосування засобів адаптації, адже загально-прийняті закони прикладної механіки, що їх використовують для вивчення процесів деформації твердих тіл, не передбачають можливості їх застосування для опису геометрії пружних ниток, і потребують побудови нових алгоритмів з урахуванням ряду додаткових факторів.

Результати досліджень. При розтягуванні кулірного трикотажу вздовж петельних рядів відбувається зміна конфігурації його окремих ділянок, а також зміна поперечних розмірів самої нитки внаслідок її пружних властивостей. Каркасна модель одновісного розтягування трикотажу вздовж петельних стовпчиків [16], побудована на основі запропонованої авторами комплексної моделі деформування трикотажу. При цьому для опису моделі введено такі поняття як точка переплетення, каркасна модель розтягування, сітка-каркас, внутрішній елементарний та обмежувальний контури петлі. *Точкою переплетення* запропоновано вважати уявну точку, яка знаходиться у центрі взаємодії взаємно переплетених

ділянок нитки. Каркасна модель розтягування трикотажу – система графічного опису структури [17], що дозволяє визначити координати точок переплетення структуроутворюючих елементів трикотажу (зазвичай це петлі, але можуть бути поєднання петель з іншими елементами, наприклад, петля та накид) у системі координат ділянки трикотажу, що моделюється. Сітка-каркас – частина каркасної моделі, що включає власне результат геометричних побудов без математичних розрахунків координат характерних точок геометричних примітивів, з яких складається сітка-каркас.

Моделювання трикотажу, що знаходиться у деформованому стані, може бути реалізовано на підставі топологічної моделіта відомостей про розташування точок переплетення кожної петлі. Алгоритм побудови каркасної моделі розтягування зразка трикотажу вздовж лінії петельного ряду по основним моментам співпадає з алгоритмом побудови моделі розтягнення зразка трикотажу вздовж петельного стовпчика та у загальному вигляді для ортогональних випадків одновісного розтягування може бути схематично описано так, як показано на рис. 1.

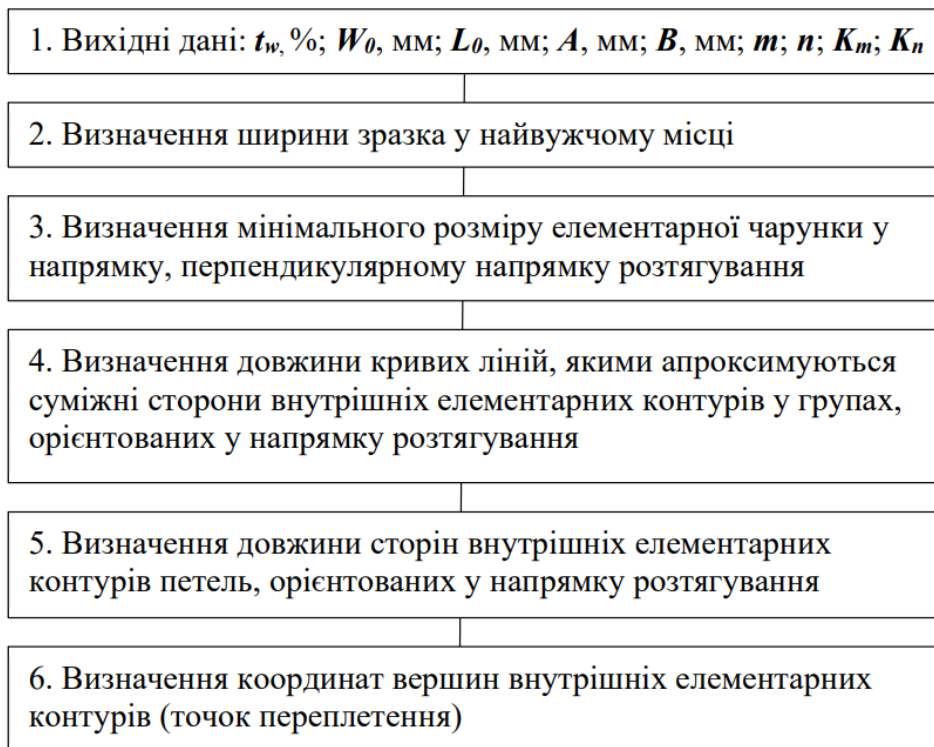


Рис. 1. Алгоритм побудови каркасної моделі розтягування зразка трикотажу

Основою для застосування алгоритму є набір вихідних даних, що включає петельний крок A та висоту петельного ряду B , мм в умовно-рівноважному стані, відносне видовження зразка на момент моделювання $t_w, \%$; кількість петельних стовпчиків m та петельних рядів n на ділянці зразка, зафіксованій між затискачами, коефіцієнт звуження петельних рядів, K_n (розтягнення вздовж петельних стовпчиків) та коефіцієнт звуження петельних стовпчиків K_m (розтягнення вздовж петельних рядів). Коефіцієнт звуження петельних стовпчиків та коефіцієнт звуження петельних рядів є відношенням ширини зразка у найвужчій ділянці при заданому значенні відносного видовження зразка до вихідної ширини зразка. Ці коефіцієнти є емпіричними.

З використанням коефіцієнта звуження [17] розраховується мінімальна ширина внутрішнього елементарного контуру петельної структури. Крок, який передбачає визначення довжини кривих ліній, яким належать вершини внутрішніх елементарних контурів та сторони контурів, орієнтовані у напрямку розтягування, відрізняється для випадків розтягнення вздовж петельних стовпчиків та рядів. У першому випадку для опису цих ліній пропонується використати дуги кіл, а у другому – криві Без'є другого порядку. На останньому кроці визначається довжина елементарних дугових сегментів, яка припадає на одну петлю.

Як показано на рис. 2 система координат зразка розташована таким чином, що вісь абсцис залишається орієнтованою вздовж петельних рядів, а вісь ординат – вздовж петельних стовпчиків. Але поступальний рух затискачів здійснюється у даному випадку вздовж осі OX системи координат зразка. Ширина зразка на рівні центрального петельного стовпчика W_{min} може бути розрахована за допомогою виразу (1).

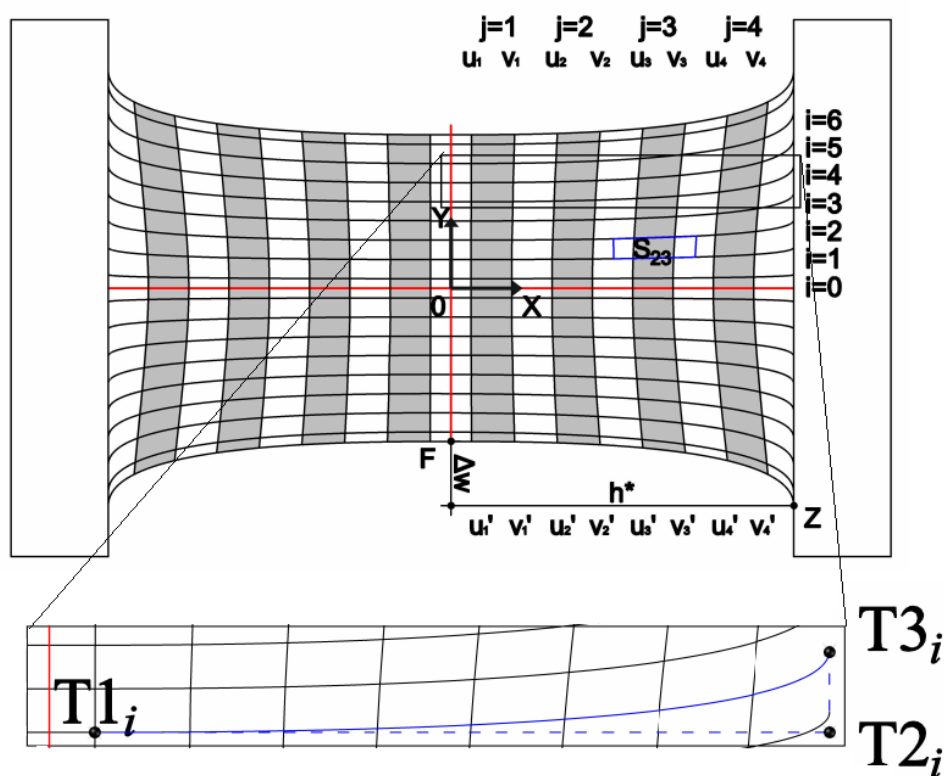


Рис. 2. Побудова сітки-каркасу зразка трикотажу під час розтягнення вздовж лінії петельного ряду

$$W_{min} = W_0 \cdot K_m. \quad (1)$$

Приймаємо, що висота всіх внутрішніх елементарних контурів, які перетинаються віссю симетрії, що проходить посередині центрального петельного стовпчика, є однаковою та дорівнює $B_{r_{min}}$:

$$B_{r_{min}} = W_{min} / n. \quad (2)$$

Оскільки контур зразка при розтягуванні трикотажу вздовж петельних рядів відрізняється від форми дуги кола, та його кривизна помітно змінюється вздовж довжини зразка, для опису границь петельних рядів з урахуванням зміни кривизни пропонується обрати

математичну базу кривих Без'є другого порядку. Крива Без'є будується по вершинам полігона, які повинні бути спряжені поліномом Бернштейна [18].

$$B_{i,q}(u) = \binom{q}{i} u^i (1-u)^{q-i}, \quad (3)$$

де

$$\binom{q}{i} = \frac{q!}{i!(q-i)!} \quad (4)$$

Рівняння кривої Без'є має вигляд

$$P(u) = \sum_{i=0}^q \binom{q}{i} u^i (1-u)^{q-i} P_i. \quad (5)$$

Для побудови набору квадратичних кривих Без'є для кожного петельного ряду необхідно знайти координати вершин трикутників, що задають форму потрібної кривої лінії.

У системі координат зразка для кожного ряду $i \in [0 \dots n/2]$ існують точки $T1_i(x1_i, y1_i)$, $T2_i(x2_i, y2_i)$, $T3_i(x3_i, y3_i)$, що задають криву (рис.2), яка обмежує зони кожного петельного ряду. Розрахунок координат цих точок пропонується провести з використанням наступних математичних виразів:

$$x1_i = \frac{A_{max}}{2}; y1_i = i \cdot Br_{min} + \frac{Br_{min}}{2}; \quad (6)$$

$$x2_i = h^*; y2_i = i \cdot Br_{min} + \frac{Br_{min}}{2}; \quad (7)$$

$$x3_i = h^*; y3_i = i \cdot B + \frac{B}{2}. \quad (8)$$

Довжина кожної кривої G_i може бути визначена з використанням спеціальних алгоритмів, які закладено в універсальні системи автоматизованого проектування.

Тоді можемо записати:

$$\check{G}_i = 2\check{G}_i/m. \quad (9)$$

Далі, для кожної точки переплетення, що лежить на кривій, що обробляється на поточному кроці алгоритму, виконується перехід від її параметрів до координат за допомогою спеціальних функцій. Мова програмування AutoLisp, вбудована у систему AutoCAD, на якій написано більшість спеціалізованих додатків, розроблених у ході даного дослідження, має для цього такі спеціальні функції:

(vlax-curve-getParamAtDistcurve-objdist) – дозволяє отримати значення параметру кривої на певній відстані від її початку;

(vlax-curve-getPointAtParamcurve-objparam) – використовує значення параметру для переходу до декартових координат точки.

Функції побудови кривої Без'є немає серед стандартних графічних інструментів AutoCAD, але ту саму форму кривої можна отримати з використанням B-сплайну другого порядку, побудованого за 3-ма вершинами $T1_i$ $T2_i$ $T3_i$.

Використання вищевикладеного алгоритму дозволяє урахувати особливості трансформування структури трикотажу у процесі розтягнення вздовж петельних рядів з метою впровадження у системи тривимірного моделювання, що передбачають можливість

відображення динаміки деформування трикотажу під дією розтягуючих зусиль. Розроблена каркасна модель деформування трикотажу та запропонований у роботі алгоритм побудови сітки-каркасу формують основу для визначення координат характерних точок елементів структури трикотажу, що знаходиться у стані однонаправленого розтягування, що, у свою чергу, є вихідними даними для побудови тривимірної моделі нитки у структурі деформованого трикотажу, придатна для побудови тривимірних моделей його структури з урахуванням деформацій розтягування.

Висновок: У ході дослідження розроблено каркасну модель розтягування трикотажу вздовж петельних рядів. Розрахунок конфігурації петельних рядів запропоновано описувати за допомогою квадратичних кривих Без'є та B-сплайну другого порядку. Положення кожного елемента структури визначається за координатами опорних точок в автоматизованому режимі, що забезпечує можливість побудови тривимірних моделей деформованого трикотажу для симуляції його фізико-механічної поведінки.

Подяка. Робота виконувалась у рамках 16.04.73 ДБ «Розробка багатофункціональних трикотажних полотен та виробів для формування речового майна та тактичного спорядження військовослужбовців» (державний реєстраційний номер 0121U109756) за підтримки Міністерства освіти і науки України.

References

Література

1. Koblyakov, A. I. (1973). *Struktura i mekhanicheskie svoystva trikotazha* [Structure and mechanical properties of knitwear]. Moscow: Legkaya industriya. 240 p. [in Russian].
1. Кобляков А. И. Структура и механические свойства трикотажа. М.: Легкая индустрия, 1973. 240 с.
2. Shalov, I. I., Kudryavin, L. A. (1989). *Osnovy proektirovaniya trikotazhnogo proizvodstva s elementami SAPR: ucheb. dlyavuzov* [Basics of designing knitwear production with CAD elements: textbook for universities]. 2nd ed., rev. and add. Moscow: Legprombytizdat. 288 p. [in Russian].
2. Шалов И. И., Кудрявин Л. А. Основы проектирования трикотажного производства с элементами САПР: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Легпромбытиздат, 1989. 288 с.
3. Dalidovich, A. S. (1970). *Osnovy teorii vyazaniya* [Knitting Theory Basics]. Moscow: Legkaya industriya. 432 p. [in Russian].
3. Далидович А. С. Основы теории вязания. М.: Легкая индустрия, 1970. 432 с.
4. Leaf, G. A. V. (1958). A property of a buckled elastic rod. *British Journal of Applied Physics*, Vol. 9, No. 2, P. 71–72.
4. Leaf G. A. V. A property of a buckled elastic rod. *British Journal of Applied Physics*. 1958. Vol. 9. № 2. P. 71–72.
5. Truevtsev, A. V. (2001). *Prikladnaya mekhanika trikotazha: uchebnoe posobie* [Applied knitwear mechanics]. St. Petersburg: SPGUTD [in Russian].
5. Труевцев А. В. Прикладная механика трикотажа: учебное пособие. СПб.: СПГУТД, 2001.
6. Shcherbakov, V. P., Skulanova, N. S. (2008). *Osnovy teorii deformirovaniyai prochnosti tekstil'nykh materialov* [Fundamentals of the theory of deformation and strength of textile materials]. Moscow: MGTU im. A.N. Kosygina. 268 p. [in Russian].
6. Щербakov В. П., Скуланова Н. С. Основы теории деформирования и прочности текстильных материалов. М.: МГТУим. А.Н.Косыгина, 2008. 268 с.
7. Kaldor, J., James, D. L., Marshner, S. (2008). Simulating knitted cloth at the yarn level. *Proceedings of SIGGRAPH*, Los Angeles, California, Vol. 27, P. 65.
7. Kaldor J., James D. L., Marshner S. Simulating knitted cloth at the yarn level. *Proceedings of SIGGRAPH*, Los Angeles, California. 2008. Vol. 27. P. 65.
8. Leaf, J., WuR., Schweickart, E., James, D. L., and S. Marschner. (2018). Interactive design of periodic yarn-level cloth patterns. *ACM Transactions on Graphics*. November. Vol. 37. Is. 6. Article 202.P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1145/3272127.3275105>
8. Leaf J., Wu R., Schweickart E., James D. L., Marschner S. Interactive design of periodic yarn-level cloth patterns. *ACM Transactions on Graphics*. November 2018. Vol. 37. Is. 6.

9. Abghary, M. J., Nadoushan, R. J., Hasani, H. (2016). Simulation of the Spherical Deformation of Biaxial Weft-Knitted Fabrics Using Meso and Macro Models. *Fibers and Polymers*, 17(10):1702–1708.
10. Broyko, A.P. (2003). Razrabotka metoda prognozirovaniya teploprovodnosti trikotazhnykh poloten na osnove chislenogo modelirovaniya teploperedachi [Development of a method for forecasting the heat conductivity of knitted towels based on numerical heat transfer simulation.]. Diss...k.t.n. S-Pb, 331s [in Russian].
11. Sperl, G., Narain, R., Wojtan, Ch. (2020). Homogenized yarn-level cloth. *ACM Transactions on Graphic*, 39, 4, Article 48 (July 2020), p. 1–16. DOI:<https://doi.org/10.1145/3386569.3392412>.
12. Cirio, G., Lopez-Moreno, J., Otaduy, M. A. (2015). Efficient simulation of knitted cloth using persistent contacts. In: *Proceedings of the 14th ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. 2015, P. 55–61.
13. Araújo, M., Figueiro, R., Hong, H. (2003). Modelling and simulation of the mechanical behavior of weft-knitted fabrics for technical applications. Part II: 3D model based on the elastica theory. *AUTEX Research Journal*, Vol. 3, No. 4, December 2003.
14. Yang, Y., Zhang, X., Chen, X., Min, S. (2021). Numerical Study on the Effect of Z-Warps on the Ballistic Responses of Para-Aramid 3D Angle-Interlock Fabrics. *Materials*, 14 (3): 479.
15. Pham, M.Q., Dцbrich, O., Тгмper, W., Gereke, T., Cherif, C. (2019). Numerical Modelling of the Mechanical Behaviour of Biaxial Weft-Knitted Fabrics on Different Length Scales. *Materials*, 12 (22): 3693.
16. Yelina, T.V., Halavska, L. Ye, Shcherban, V. Yu., Kolisko, O. Z., Bobrova, S. Yu. (2021). Karkasna model odnoosnoho roztyahuvannia kulirnoho trykotazhu v zdovzh petelnykh stovpchykiv [Framemodel of uniaxial stretching of weft-knitted structures in the wale direction]. *Visnyk KNUVD*, No. 1, P. 43–53. <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2021.1.4> [in Ukrainian].
17. Yelina, T. V. (2021). Rozvytok naukovykh osnov prohozuvannia strukturnykh kharakterystyk trykotazhu u protsesi yoho deformuvannia. Diss... dokt. tekhn. nauk. Kyiv, KNUVD [in Ukrainian].
18. Li, K. (2004). *Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE)*. S-Pb.: Piter. 560 p. [in Russian].
- Article 202. P. 1–15. DOI:
<https://doi.org/10.1145/3272127.3275105>.
9. Abghary M. J., Nedoushan R. J., Hasani H. Simulation of the spherical deformation of biaxial weft-knitted fabrics using meso and macro models. *Fibers and Polymers*. 2016. 17(10), 1702–1708.
10. Бройко А. П. Разработка метода прогнозирования теплопроводности трикотажных полотен на основе численного моделирования теплопередачи: дисс... к.т.н. С-Пб, 2003. 331 с.
11. Sperl G., Narain R., Wojtan Ch. Homogenized yarn-level cloth. *ACM Transactions on Graphics*. July 2020. Vol. 39. Is. 4. Article 48. P. 1–16. DOI:<https://doi.org/10.1145/3386569.3392412>.
12. Cirio G., Lopez-Moreno J., Otaduy M. A. Efficient simulation of knitted cloth using persistent contacts. In: *Proceedings of the 14th ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. 2015. P. 55–61.
13. Araújo M., Figueiro R., Hong H. Part II: 3D model based on the elastica theory. *AUTEX Research Journal*. December 2003. Vol. 3. No. 4. P. 166–172.
14. Yang Y., Zhang X., Chen X., Min S. Numerical Study on the Effect of Z-Warps on the Ballistic Responses of Para-Aramid 3D Angle-Interlock Fabrics. *Materials*. 2021. 14 (3): 479.
15. Pham M. Q., Dцbrich O., Тгмper W., Gereke T., Cherif C. Numerical Modelling of the Mechanical Behaviour of Biaxial Weft-Knitted Fabrics on Different Length Scales. *Materials*. 2019. 12 (22): 3693.
16. Єліна Т. В., Галавська Л. Є., Щербань В. Ю., Колиско О. З., Боброва С. Ю. Каркасна модель одноосного розтягування кулірного трикотажу вздовж петельних стовпчиків. *Вісник КНУТД*. 2021. № 1 (154). С. 43–53. <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2021.1.4>.
17. Єліна Т. В. Розвиток наукових основ прогнозування структурних характеристик трикотажу у процесі його деформування: дис... д.т.н. Київ, КНУТД, 2021.
18. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). С-Пб.: Питер, 2004. 560 с.

BOBROVA SVITLANA

Candidate of Technical Science, Associate Professor
Department of Textile Technology and Design,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3381-9915>
Scopus Author ID: 57203865072
E-mail: bobrova.sy@knuutd.com.ua

HALAVSKA LIUDMYLA

Doctor of Technical Science, Professor
Department of Textile Technology and Design,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6994-6641>
Scopus Author ID: 57191413261
ResearcherID: O-1750-2018
E-mail: galavska.ly@knuutd.edu.ua

YELINA TETIANA

Candidate of Technical Science, Associate Professor
Department of Textile Technology and Design,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9310-0582>
Scopus Author ID: 57203861122
E-mail: yelina.tv@knuutd.edu.ua

SHCHERBAN VOLODYMYR

Doctor of Technical Science, Professor
Department of Computer Science and Technologies
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4274-4425>
Scopus Author ID: 57203866200
E-mail: shherban.vy@knuutd.com.ua

KOLISKO OKSANA

Candidate of Technical Science, Associate Professor
Department of Computer Science and Technologies
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4043-1238>
Scopus Author ID: 57204469977
E-mail: kntp@knuutd.com.ua

БОБРОВА С. Ю., ЕЛИНА Т. В., ГАЛАВСКАЯ Л. Е., ЩЕРБАНЬ В. Ю., КОЛЫСКО О.З.

Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

**КАРКАСНАЯ МОДЕЛЬ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ
КУЛИРНОГО ТРИКОТАЖА ВДОЛЬ ПЕТЕЛЬНОГО СТОЛБИКА**

Цель. Целью данного исследования является разработка математического обеспечения процесса трансформирования каркасной модели кулирного трикотажа под действием растягивающих усилий вдоль петельных рядов для дальнейшего трехмерного моделирования структуры трикотажа.

Методика. В процессе исследования использованы методы теоретического анализа и синтеза, основные положения теории вязания, методы геометрического моделирования и параметризации.

Результаты. Учёт деформации трикотажа при эксплуатации одежды является одним из определяющих факторов обеспечения качества проектных решений. При растяжении кулирного трикотажа вдоль петельных рядов происходит изменение конфигурации его отдельных участков, а также изменение поперечных размеров самой нити вследствие силового взаимодействия между смежными элементами структуры. Для моделирования физико-механического поведения трикотажа, находящегося под действием растягивающих усилий, предлагается использовать комплексную модель деформирования трикотажа, частью которой является предложенная каркасная модель одноосного растяжения. В работе представлен алгоритм построения каркасной модели растяжения образца трикотажа вдоль линии петельного ряда. Основой для алгоритма является набор исходных данных, включающий петельный шаг и высоту петельного ряда в условно равновесном состоянии, относительное удлинение образца на момент моделирования, количество петельных столбиков и петельных рядов на участке образца, коэффициент сужения петельных рядов.

Научная новизна. В работе исследованы особенности трансформирования структуры трикотажа в процессе растяжения вдоль петельных рядов и предложено алгоритмическое и

математическое обеспечение автоматизированного построения сетки-каркаса в контексте трехмерного моделирования, являющееся необходимым для обеспечения возможности отображения динамики деформирования трикотажа под действием растягивающих усилий.

Практическая значимость. Каркасная модель деформирования трикотажа и предложенный в работе алгоритм построения сетки-каркаса формируют основу для определения координат характерных точек элементов структуры трикотажа, находящегося в состоянии одноосного растяжения, для построения трехмерной модели нити в структуре деформированного трикотажа.

Ключевые слова: кулирный трикотаж; моделирование деформаций; петельный ряд; каркасная модель; одноосное растяжение; процесс деформирования.

BOBROVA S. Yu., YELINA T. V., HALAVSKA L. Ye., SHCHERBAN V. Yu., KOLISKO O.Z.
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

FRAME MODEL OF STRETCHING OF WEFT-KNITTED FABRICS IN THE COURSEWISE DIRECTION

Purpose. The purpose of this study is to develop a mathematical description of the transformation of the frame model of weft-knits under the action of tensile forces in the coursewise direction for further three-dimensional modeling of the knited structure.

Methodology. Methods of theoretical analysis and synthesis, basics of knitting theory, methods of geometric modeling and parameterization were used in the research process.

Findings. Considering the knitwear stretching during the use of the clothing is one of the determining factors of the quality of design decisions. When stretching the weft-knitted fabrics in the coursewise direction, the configuration of its individual stitches' changes, as well as the thread's cross-section due to the force interaction between the adjacent structure elements. To simulate the physical and mechanical behavior of knitwear under the stretching, it is suggested using a complex model of knitwear deformation, that includes the suggested frame model of uniaxial coursewise stretching of knitted fabrics. An algorithm for constructing a frame model of stretching a sample of knitted fabric in the coursewise direction is described in the paper. The algorithm is based on the structure parameters, including the wale spacing and course spacing in a dry relaxed state, the relative elongation of the sample at the time of modeling, number of wales and courses in the sample, the coefficient of courses narrowing.

Scientific novelty. The paper investigates the features of the transformation of the knitting structure during stretching in the coursewise direction and offers algorithmic and mathematical support for the automated generation of the mesh frame in the context of three-dimensional modeling, which provides for the possibility of considering the dynamics of deformation of knitted fabric undergoing tensile deformations.

Practical value. Frame model of the weft-knits deformation and algorithm of mesh-frame construction suggested in the paper, form the basis for determination of coordinates of characteristic points of the structural elements of the knit in a state of uniaxial tension for construction of a three-dimensional model of thread a deformed knitted fabric.

Keywords: weft-knits; simulation of deformation; course; frame model; uniaxial stretching; deformation process.