

УДК 677.075.3:
620.17

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

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

КАРКАСНА МОДЕЛЬ ОДНООСНОГО РОЗТЯГУВАННЯ КУЛІРНОГО ТРИКОТАЖУ ВЗДОВЖ ПЕТЕЛЬНИХ СТОВПЧИКІВ

Мета. Метою даного дослідження є розробка каркасної моделі розтягування кулірного трикотажу вздовж петельних стовпчиків, придатної для подальшої інтеграції у алгоритм побудови тривимірної моделі трикотажу у стані розтягу та моделювання інтерактивної динаміки деформацій.

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

Результати. Моделювання фізико-механічної поведінки трикотажу у комп'ютерному середовищі є одним з перспективних шляхів підвищення рівня відповідності трикотажних виробів вимогам комфортності та функціональності. Однак складність внутрішньої будови, анізотропія властивостей та нестабільність параметрів петельної структури обумовлюють необхідність пошуку нетривіальних шляхів вирішення задачі математичного опису тривимірної моделі нитки, пров'язаної у трикотаж, з урахуванням деформацій розтягування.

У ході дослідження розроблено каркасну модель одноосного розтягу трикотажу вздовж петельних стовпчиків. В основу каркасної моделі покладено уявлення про трикотаж як логічно-впорядкований набір елементів, кожен з яких пов'язаний з іншими елементами відповідно до топології переплетення. Каркас фрагмента трикотажу описується як набір стержнів та шарнірів. Шарніри розташовані у точках переплетення голкових та платинних дуг петель, а кожен стержень у моделі є уявним елементом, який репрезентує комплекс силових факторів, що перешкоджають зміні відстані між шарнірами, з'єднаними даним стержнем.

У процесі деформування геометричні характеристики елементів змінюються, тоді як логічні зв'язки залишаються незмінними. Каркасна модель дозволяє визначити координати точок переплетення у системі координат зразка, відносно розташування систем координат кожного елементарного фрагменту, що відповідають окремим петлям, координат характерних точок петлі для переходу до тривимірної моделі структури трикотажу.

Наукова новизна. Вперше розроблено каркасну модель деформування трикотажу, придатну для тривимірної моделювання його структури з урахуванням деформацій розтягу.

Практична значимість. Розроблена модель може бути використана у якості математичного забезпечення систем автоматизованого проектування трикотажу.

Ключові слова: трикотаж; каркасна модель; шарнірно-стержньова модель; деформації поздовжнього розтягування.

Вступ. Забезпечення комфортності одягу в значній мірі визначається його пружно-еластичними властивостями. Розтяжність трикотажного виробу залежить від його конструкції, структури переплетення, властивостей ниток та інших факторів. Застосування сучасних програмно-аналітичних комплексів розширює можливості вивчення фізико-механічних процесів та властивостей матеріалів шляхом тривимірної моделювання та симуляції. Проте більшість моделей трикотажу описують його структуру в умовно-рівноважному стані.

Порівняно з іншими текстильними матеріалами трикотаж має легкорухому структуру. Процеси деформування трикотажу досліджувались у роботах О.І. Коблякова [1], І.І. Шалова та Л.О. Кудрявіна [2], О.І. Далідовича [3] та ін. У роботах Г. Ліфа [4], О.В. Труєвцева [5], В.П. Щербакова та Н.С. Скуланової [6] знайшло відображення застосування теорії гнучких

пружних стержнів у задачах опису геометрії нитки. Встановлення зв'язку між геометричними характеристиками структури трикотажу та фізико-механічними властивостями трикотажних полотен та виробів є складною багатокомпонентною задачею. З наукових публікацій останніх років відомо про досвід застосування різних підходів до її вирішення. Так, С. Пуанклу зі співавторами [7] досліджують характер розповсюдження деформацій (елементарних переміщень) всередині зразка трикотажу переплетення гладь з нейлонової мононитки під час однобічного розтягування вздовж петельних стовпчиків. Автори аналізують зміну положення геометричного центру кожної петлі на обраному етапі розтягування за фотографічними зображеннями, зробленими через заданий мінімальний інтервал видовження. Автори роботи [8] досліджують способи моделювання сферичної деформації трикотажу переплетення ластик 1x1 з двома системами утокових ниток, розташованих у взаємно перпендикулярних напрямках. Результати роботи свідчать, що інтегровані прямі ділянки армуючих утокових ниток сприймають основне навантаження при розтягуванні. У роботі [9] досліджено захисні властивості 3D тканин з параарамідою сировини з метою вивчення перспектив використання тканих панелей для гнучких і м'яких конструкцій бронежилетів. У процесі моделювання деформацій армувальної тканини у складі композиційного матеріалу [10] розглядають 4 типи моделей: гіпоеластична і гіпереластична суцільні, дискретна (з відображенням окремих ниток) та напівдискретна (semi-discrete) моделі. У дискретній моделі кожна нитка моделюється кінцевими елементами оболонки, враховується контакт з тертям і можливе ковзання між нитками. Напівдискретний підхід характеризується тим, що внутрішня віртуальна робота отримується як сума напруженості, зсуву в площині та згинання всіх сплетених елементарних осередків всередині елемента. Ряд важливих розробок реалізовано дослідниками у сфері комп'ютерної графіки [11–14]. Алгоритм моделювання, запропонований у роботі [11], побудовано на встановленні необхідної форми поверхні трикотажу з вибором виду та конфігурації окремих елементів структури трикотажу та переході від опису поверхні виробу до опису конфігурації нитки у кожному з елементів з урахуванням їх деформації. Сама ж нитка вважається при цьому нерозтяжною та гнучкою і описується як трубка з використанням математики В-сплайнів. У роботі [12] запропоновано ефективний метод моделювання візерункових переплетень. Наукові розробки, що поєднують фізику, комп'ютерну графіку та технологію текстильних матеріалів, виконуються сьогодні з урахуванням того, що незважаючи на потужні можливості технічних та програмних засобів, розрахункові ресурси комп'ютерів не безмежні. Текстильні матеріали мають складну внутрішню структуру, де кожен елемент – свої геометричні характеристики та зв'язки з іншими елементами [13]. З одного боку, детальний опис геометрії ниток та волокон у структурі трикотажу надає можливість точного автоматичного визначення співвідношення об'ємів повітря та волокнистого матеріалу в об'ємі трикотажу, площі поверхні ниток і багато інших показників. З іншого боку – будь-яке ускладнення геометрії призводить до значного збільшення розрахункового часу комп'ютера. Під гомогенізацією розуміють заміну моделі, що містить компоненти з різними властивостями (нитка та повітря), умовно-однорідною моделлю, фізичні характеристики якої співпадають з характеристиками реального матеріалу. Методи гомогенізації властивостей дозволяють також створити деталізовану модель певного елементарного об'єму, наприклад, однієї петлі, або одного рапорту з деталізацією на рівні ниток (мезомодель), визначити на його фізичні характеристики (наприклад, тепловий опір) з урахуванням різномірності компонентів, та передати отриманий показник в модель більш високого рівня (макромодель), яка репрезентує об'єм трикотажу як тривимірного об'єкту, яке має висоту, ширину і довжину та гомогенізовані (умовно-однорідні) фізичні властивості. Відомо також про існування підходів до тривимірного моделювання деформацій трикотажу [14] з урахуванням зміщення точок контакту ниток, що дозволяє описати динаміку

деформації на рівні пряжі, досягаючи складних, нелінійних та пластичних ефектів у макроскопічному масштабі. Авторами статті [15] представлено теоретичну модель, засновану на теорії пружності, яку використовують для прогнозування властивостей на розтяжність трикотажних полотен, виготовлених зі скловолокна. У роботі [16] досліджено відмінності балістичних характеристик 3D та 2D тканих полотен з параарамідних ниток для вивчення ефекту Z-деформацій. Під час проникнення снаряда у полотна з блокуючими нитками Z-основи і без них оцінюється поглинання енергії, деформації і розподіл напруги. За результатами дослідження автори роботи свідчать, що 3D-тканини мають більш широкий діапазон розподілу напружень у площині. Властивості трикотажу утокових переплетень, виготовлених на модифікованій плосков'язальній машині Aries 3D (Steiger Participations sa., Vionnaz, Швейцарія) розглянуто у роботі [17]. За даними публікації, моделювання проводилося за допомогою програмного забезпечення LS-DYNA (Livermore Software Technology Corporation, Лівермор, Каліфорнія, США). Автором роботи [18] встановлено залежність властивостей армованих полімерних композитів від природи матеріалу, геометричних розмірів підсилюючих конструкційних елементів, хімічної сумісності і способів формування.

Постановка завдання. Розвиток універсальних програмно-аналітичних комплексів, що базуються на таких методах як метод скінченних елементів та метод скінченних об'ємів – сприяє пошуку алгоритмів використання таких систем у прогнозуванні показників комфортності текстильного одягу шляхом симуляції гідро-газодинамічних процесів, що мають місце у підодяговому просторі та у навколишньому середовищі. Враховуючи те, що конфігурація нитки та параметри петель є визначальними факторами, що впливають на розмір та форму міжниткових проміжків (пор), такі характеристики як повітропроникність, гігроскопічність, теплозахисні властивості, на пряму залежать від стану деформування кожного елементу структури трикотажу в межах досліджуваного фрагменту полотна. Незважаючи на значні досягнення у моделюванні трикотажу, багато питань залишаються ще відкритими. Питання вивчення особливостей зміни геометрії нитки під дією розтягуючих зусиль з метою оцінки фізико-механічної поведінки в контексті комп'ютерної симуляції властивостей раніше не розглядалося. Ідея застосування загально-інженерних програмно-аналітичних комплексів, побудованих на алгоритмах методів скінченних елементів, скінченних об'ємів, апарату лінійної та нелінійної теорії деформування до трикотажних полотен обговорюється вже давно. Але якщо вивчення деформацій твердих тіл відбувається з використанням законів прикладної механіки, апарат дослідження процесів деформування трикотажу ще не відпрацьовано.

Результати досліджень. У процесі розтягування трикотажу топологія нитки залишається незмінною. Зміна лінійних розмірів трикотажу та його окремих ділянок відбувається завдяки ряду процесів залежно від виду переплетення та властивостей ниток. До таких процесів можна віднести зменшення кривизни ділянок нитки, орієнтованих у напрямку розтягування, зміну відстані між точками контакту, що відбувається за рахунок проковзування ниток, видовження нитки. Припустимо, що зразок трикотажу у недеформованому стані має прямокутну форму та складається з $m \times n$ елементарних прямокутних ділянок. Причому m – кількість петельних стовпчиків зразка, а n – кількість петельних рядів. Тоді номер петельного ряду i , якому належить петля трикотажу S_{ij} , змінюється від 1 до n , а номер петельного стовпчика, j – від 1 до m . На рис. 1 елементарна ділянка полотна, обмежена прямокутником з вершинами у точках P_1, P_2, P_3 та P_4 , відповідає петлі S_{ij} .

У процесі деформування нерівномірність розтягування призводить до того, що геометрія границь елементарної ділянки змінюється та може відрізнятись від прямокутника. Назвемо чотирикутник P_1, P_2, P_3, P_4 обмежувальним контуром петлі S_{ij} . Коли полотно

знаходиться у вільному стані, ширина прямокутника дорівнює петельному кроку трикотажу, а його висота – висоті петельного ряду. Кожна петля має чотири уявні точки у місцях переплетення ниток з ділянками нитки, що належать іншим петлям. Для зручності будемо далі називати їх точками переплетення. На рис. 1 це точки $u_{i,j}$ і $v_{i,j}$, у яких голкова дуга (3) переплітається з платинними дугами петлі наступного ($i+1$ -го) петельного ряду, та точки $u_{i-1,j}$ і $v_{i-1,j}$, у яких платинні дуги даної петлі (1) переплітаються з голковою дугою петлі попереднього ($i-1$ -го) петельного ряду. *Внутрішнім контуром* будемо називати чотирикутник, з вершинами у точках $u_{i,j}$, $v_{i,j}$, $u_{i-1,j}$ і $v_{i-1,j}$. Під час розтягування вздовж петельного стовпчика відбувається розпрямлення паличок остова (2), перетягування нитки з голкових (3) та платинних дуг (1) у палички остова (2), розтяг матеріалу нитки на ділянках паличок остова (2).

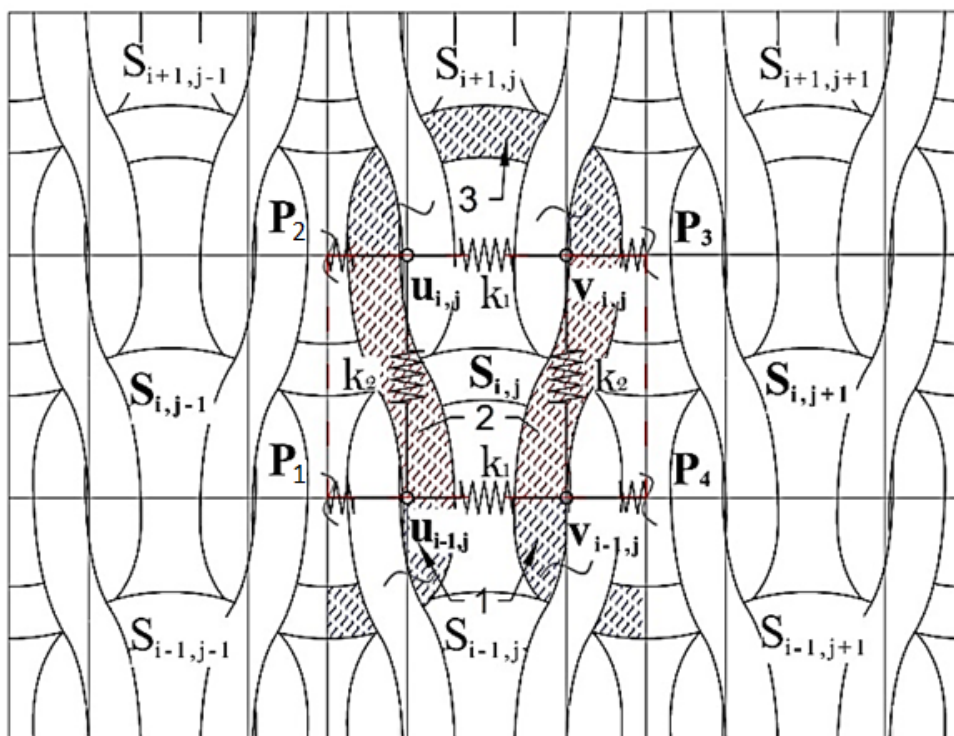
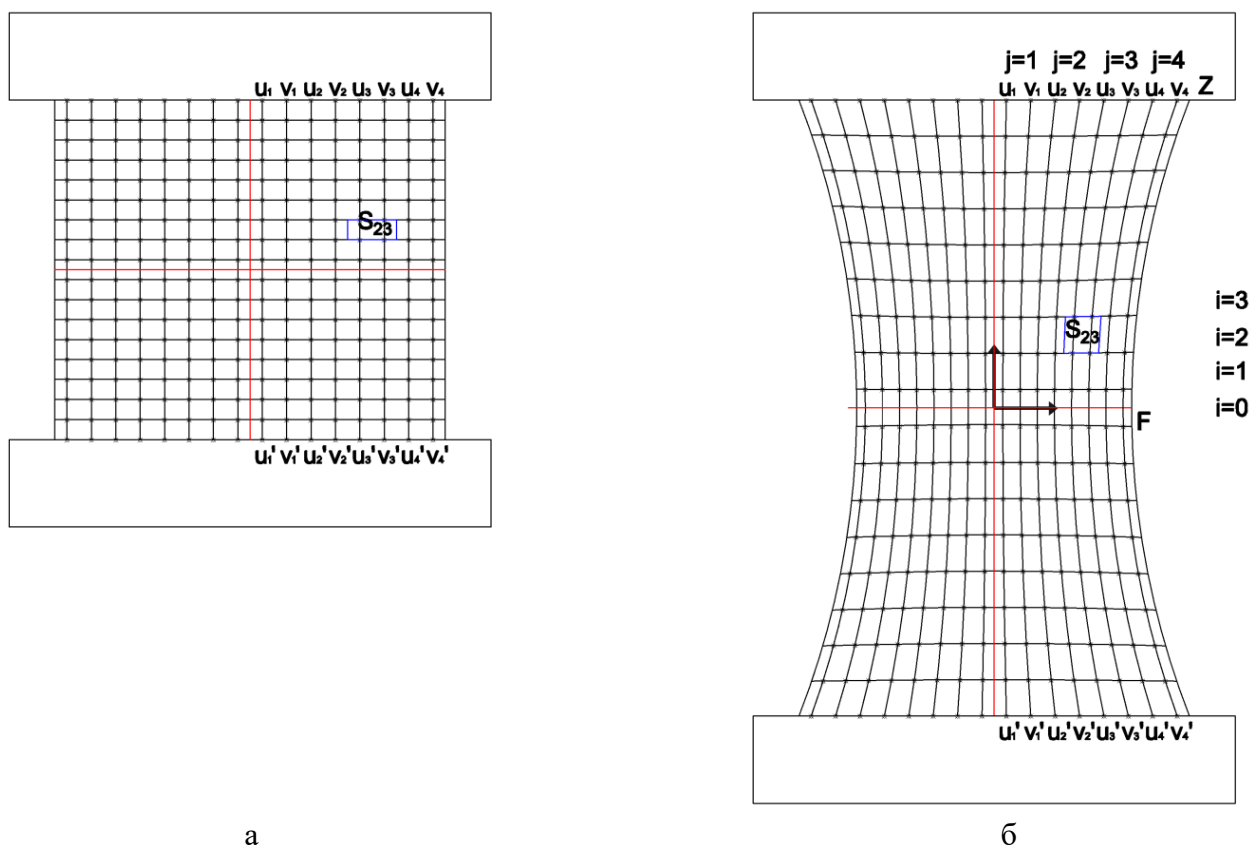


Рис. 1. Каркасна модель петлі трикотажу переплетення гладь

Моделювання трикотажу, що знаходиться у деформованому стані, може бути реалізовано на підставі топологічної моделі [19, 20], та відомостей про розташування точок переплетення кожної петлі (u_{ij} , v_{ij}). Положення точок переплетення окремої петлі та характеру деформування обмежувального контуру залежить не тільки від властивостей матеріалів, але й від місця розташування елементарної чарунки у системі координат зразка: відстань від крамок зразка, деформації сусідніх чарунок і т. ін. Особливість розтягування трикотажу полягає у тому, що його слід розглядати скоріш як конструкцію, аніж як матеріал. Цю думку неодноразово висловлювали автори публікацій, присвячених вивченню деформаційних властивостей трикотажу [1, 5]. Деформація розтягу трикотажу пов'язана з подоланням низки силових факторів, до яких відносяться сила тертя нитки об нитку, пружність матеріалу нитки, жорсткість нитки на згин та кручення. Нехай k_1 – умовний коефіцієнт пружності, що характеризує комплексну дію силових факторів, що перешкоджають розтягуванню елементарної чарунки трикотажу вздовж петельних рядів, а k_2 – аналогічний показник для розтягу чарунки вздовж петельних стовпчиків (рис. 1). Оскільки на різних стадіях розтягування значущість силових факторів змінюється, значення цих коефіцієнтів також буде

різним для різних етапів розтягу. Припустимо, що розтяг елементарної чарунки по довжині t_w (у напрямку петельних стовпчиків) можна розділити на 3 етапи. На першому етапі $0 < t_w < R_{w1}$, де R_{w1} – значення видовження, при якому починається перетягування нитки з голкових та платинних дуг (3 та 1 на рис. 1) у палички остова (2 на рис. 1) та зростає вагомість сили тертя у загальному комплексі силових факторів. На другому етапі $R_{w1} < t_w < R_{w2}$, де R_{w2} – значення видовження, %, при якому припиняється процес перетягування, і починається змінання матеріалу нитки у зонах переплетення та його розтяг на вільних ділянках, орієнтованих у напрямку розтягування. На третьому етапі $R_{w2} < t_w < R_{wmax}$, де R_{wmax} – максимальне видовження даного елемента.

Розглянемо алгоритм побудови геометричного опису розтягування сітки-каркасу. Оскільки нитка може бути представлена у механічних моделях як гнучкий пружний стержень, її жорсткість на розтяг вздовж власної осі набагато перевищує жорсткість на згин та кручення, зменшення відстані між окремими точками переплетення відбувається в основному за рахунок перетягування ниток і не супроводжується зменшенням довжини ділянок нитки, орієнтованих перпендикулярно до напрямку розтягування. Нехай зразок трикотажу, що складається з n петельних стовпчиків та m петельних рядів закріплено у затискачах як показано на рис. 2а. Після прикладання зусилля розтягу зразок розтягується так, як показано на рис. 2б.



а б
 Рис. 2. Побудова сітки-каркасу у розтягнутому стані

Причому форма та розміри елементарних контурів змінюються нерівномірно по площі зразка. Ширина зразка на рівні затискачів залишається незмінною та дорівнює W_0 . А ширина зразка на рівні центрального петельного ряду (максимально віддаленого від затискачів) дорівнює W_{min} . Якщо коефіцієнт звуження позначити як K_n ,

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

Приймаємо припущення, що зміна розмірів та конфігурації елементарних контурів відбувається симетрично відносно центральних осей у системі координат зразка, ширина елементарних контурів, що знаходяться на горизонтальній осі однакова та дорівнюють Ar_{min} , причому

$$Ar_{min} = \frac{W_{min}}{n_g}. \quad (2)$$

Приймаємо також, що горизонтальні ділянки елементарних обмежувальних контурів, що перетинають вертикальну вісь симетрії зразка (ОУ у системі координат зразка), залишаються горизонтальними.

Точки переплетення u_{ij} та v_{ij} кожного петельного стовпчика лежать на однойменних вертикальних лініях u_j та v_j до моменту прикладання зусиль. Після розтягування на задану величину r вони розташовуються на дугах, що проходять через точки переплетення, що належать даному петельному стовпчику та петельним рядам, що закріплені у затискачах. Радіуси цих дуг збільшуються від бокових кромek до центру зразка та можуть бути знайдені за формулою

$$r = \frac{(h^*)^2 + \Delta w^2}{2 \cdot \Delta w}, \quad (3)$$

де h^* – половина довжини зразка у стані розтягу (рис. 3б);

Δw – висота дугового сегменту (рис. 3б).

Слід також зазначити, що точки центрів дуг знаходяться на продовженні осі OX , тому центральний кут дуги G , або кут FCZ (рис. 3) може бути визначений як

$$\alpha = \arctg \left(\frac{Yz - Yc}{Xc - Xz} \right). \quad (4)$$

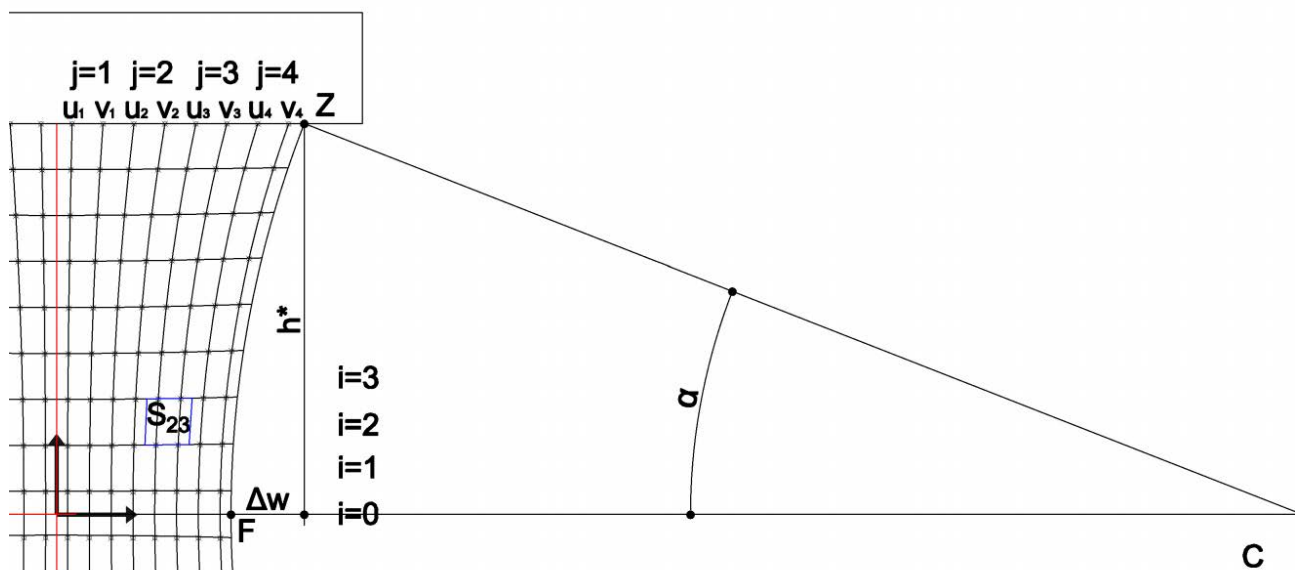


Рис. 3. Центральний кут дугового сегмента G

Відповідно до прийнятих припущень, кожен внутрішній контур остова окремої петлі S_{ij} обмежено дуговими сегментами з вершинами у точках u_{ij} v_{ij} $u_{i-1,j}$ $v_{i-1,j}$. Точки переплетення остовів петель певного петельного стовпчика розташовуються на дугах $u_j u_j'$, та $v_j v_j'$. Причому, можемо записати, що для кожного петельного ряду j довжина дуги G_{uj}

$$\check{G}_{uj} = (\pi \cdot r_{uj} \cdot \alpha_{uj}) / 180^\circ, \quad (5)$$

де r_{uj} – радіус дуги $u_j u_j'$, а α_{uj} – її центральний кут.

Тоді можемо записати:

$$u_{ij} \overline{u_{i-1,j}} = 2\check{G}_{uj} / n_h. \quad (6)$$

Вирази для точок v_{ij} та $v_{i-1,j}$ приймають вигляд

$$\check{G}_{vj} = (\pi \cdot r_{vj} \cdot \alpha_{vj}) / 180^\circ, \quad (7)$$

де r_{vj} – радіус дуги $v_j v_j'$, а α_{vj} – її центральний кут.

Відповідно, дугова відстань для окремого ряду

$$v_{ij} \overline{v_{i-1,j}} = 2\check{G}_{vj} / n_h. \quad (8)$$

Для даної моделі також прийнято припущення, що довжина елементарних дуг, що відповідають кожному петельному ряду, залишається незмінною для окремих геодезичних ліній та може бути знайдена як

$$\check{e} = 2 * \frac{\overline{FZ}}{n_v}. \quad (9)$$

Даний алгоритм визначення геометричних розмірів кожного елемента каркасної моделі дозволяє також перейти до шарнірно-стержнєвої моделі, шляхом підключення операторів визначення відстаней між точками переплетення (вершинами чотирикутника, що репрезентує внутрішній контур петлі) через умовні коефіцієнти пружності k_1 та k_2 (рис. 1).

Висновок: У ході дослідження запропоновано каркасну модель розтягування трикотажу вздовж петельних стовпчиків, що базується на уявленні про трикотаж як про впорядковану сукупність елементів, кожен з яких належить певному петельному ряду та петельному стовпчику та має зв'язки з іншими елементами. Каркас фрагмента трикотажу описується як набір стержнів та шарнірів. Шарніри розташовані в уявних точках, у яких ділянки нитки однієї петлі переплетені з ділянками ниток інших петель, а кожен стержень у моделі є уявним елементом, який репрезентує комплекс силових факторів, що перешкоджають зміні відстані між шарнірами, з'єднаними даним стержнем. Запропоновано математичне забезпечення для автоматизації розрахунку координат точок переплетення у процесі розтягування.

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

References

1. Koblyakov, A. I. (1973). *Struktura i mekhanicheskie svoystva trikotazha* [Structure and mechanical properties of knitwear]. Moscow: Legkaya industriya. 240 p. [in Russian].
2. Shalov, I. I., Kudryavin, L. A. (1989). *Osnovy proektirovaniya trikotazhnogo proizvodstva s elementami SAPR: ucheb. dlya vuzov* [Basics of designing knitwear production with CAD elements: textbook for universities]. 2nd ed., rev. and add. Moscow: Legprombytizdat. 288 p. [in Russian].
3. Dalidovich, A. S. (1970). *Osnovy teorii vyazaniya* [Knitting Theory Basics]. Moscow: Legkaya industriya. 432 p. [in Russian].
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.
5. Truevtsev, A. V. (2001). *Prikladnaya mekhanika trikotazha: uchebnoe posobie* [Applied knitwear mechanics]. St. Petersburg: SPGUTD [in Russian].
6. Shcherbakov, V. P., Skulanova, N. S. (2008). *Osnovy teorii deformirovaniya i prochnosti tekstil'nykh materialov* [Fundamentals of the theory of deformation and strength of textile materials]. Moscow: MGTU im. A.N. Kosygina. 268 p.
7. Poincloux, S., Adda-Bedia, M., Lechenault, F. (2018). Crackling dynamics in the mechanical response of knitted fabrics. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 121, No. 5, 058002.
8. 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.
9. Abteu, M. A., Boussu, F., Bruniaux, P., Hong, Y. (2021). Dynamic Impact Surface Damage Analysis of 3D Woven Para-Aramid Armour Panels Using NDI Technique. *Polymers*, 13: 877.
10. Boisse, P., Aimène, Y., Dogui, A. (2010). Hypoelastic, hyperelastic, discrete and semi-discrete approaches for textile composite reinforcement forming. *Int J Mater Form*, 3 (2): 1229–1240.
11. 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.
12. Jonathan Leaf, Rundong Wu, Eston Schweickart, Doug L. James, and Steve Marschner (2018). Interactive Design of Periodic Yarn-Level Cloth Patterns. *ACM Transactions on Graphic*, 37, 6, Article 202 (November 2018), 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1145/3272127.3275105>.

Література

1. Кобляков А. И. Структура и механические свойства трикотажа. М.: Легкая индустрия, 1973. 240 с.
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. Далидович А. С. Основы теории вязания. М.: Легкая индустрия, 1970. 432 с.
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. Труевцев А. В. Прикладная механика трикотажа: учебное пособие. СПб.: СПГУТД, 2001.
6. Щербаков В. П., Скуланова Н. С. Основы теории деформирования и прочности текстильных материалов. М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2008. 268 с.
7. Poincloux S., Adda-Bedia M. and Lechenault F. Crackling dynamics in the mechanical response of knitted fabrics. *Phys. Rev. Lett.* 2018. Vol. 121, № 5, 058002.
8. 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.
9. Abteu M. A., Boussu F., Bruniaux P., Hong Y. Dynamic Impact Surface Damage Analysis of 3D Woven Para-Aramid Armour Panels Using NDI Technique. *Polymers*. 2021. 13. 877.
10. Boisse P., Aimène Y., Dogui A. Hypoelastic, hyperelastic, discrete and semi-discrete approaches for textile composite reinforcement forming. *Int J Mater Form*. 2010. No. 3 (2). P. 1229–1240.
11. 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.
12. Jonathan Leaf, Rundong Wu, Eston Schweickart, Doug L. James, and Steve Marschner. Interactive design of periodic yarn-level cloth patterns. *ACM Transactions on Graphics*. November 2018. Vol. 37. Is. 6.

13. 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>.
14. 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.
15. de Araújo, M., Figueiro, R., Hong, H. (2003). Modelling and simulation of the mechanical behaviour 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.
16. 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.
17. Pham, M.Q., Döbrich, O., Trümper, 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.
18. Rakhimov, F. (2013). Osnovy razrabotki konstruksiy i tekhnologiy trikotazhno-armirovannykh polifunksionalnykh kompozitov [Fundamentals of development of structures and technologies of knitted-reinforced multifunctional composites]. *Yangi asr avlodi* [in Russian].
19. Halavska, L. Ye., Yelina, T. V. (2012). Rozrobka systemy koduvannia nytok u strukturi kulirnoho trykotazhu [Development of a thread encoding system in a weft-knitted structure]. *Visnyk KhNU*, No. 3, P. 222–227 [in Ukrainian].
20. Yelina, T. V., Halavska, L. Ye. (2013). Rozrobka alhorytmu analizu danykh topologichnoi modeli nytky v strukturi trykotazhu [Development of an algorithm for analyzing the data of the topological model of the thread in the knitwear structure]. *Visnyk KhNU*, No. 3, P. 69–73 [in Ukrainian].
- Article 202. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1145/3272127.3275105>.
13. Sperl G., Narain R., Wojtan Ch. 2020. 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>.
14. 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.
15. de Araújo M., Figueiro R., and Hong H. Modelling and simulation of the mechanical behaviour Of weft-knitted fabrics for technical applications. Part II: 3D model based on the elastica theory. *AUTEX Research Journal*. December 2003. Vol. 3. No. 4. P. 166–172.
16. 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.
17. Pham M. Q., Döbrich O., Trümper 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.
18. Рахимов Ф. Основы разработки конструкций и технологий трикотажно-армированных полифункциональных композитов. *Янги аср авлоди*, 2013.
19. Галавська Л. Є., Єліна Т. В. Розробка системи кодування ниток у структурі кулірного трикотажу. *Вісник ХНУ*. 2012. № 3. С. 222–227.
20. Єліна Т. В., Галавська Л. Є. Розробка алгоритму аналізу даних топологічної моделі нитки в структурі трикотажу. *Вісник ХНУ*. 2013. № 3. С. 69–73.

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@knutd.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@knutd.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@knutd.edu.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: kityp@knutd.com.ua

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@knutd.com.ua

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

Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

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

Цель. Целью данного исследования является разработка каркасной модели растяжения кулирного трикотажа вдоль петельных столбиков, с возможностью дальнейшей интеграции в алгоритм построения трехмерной модели трикотажа в состоянии растяжения и моделирования интерактивной динамики деформации.

Методика. В процессе исследования использовались методы теоретического анализа, основные положения теории вязания, топологическая модель трикотажа, методы геометрического моделирования и параметризации.

Результаты. Моделирование физико-механического поведения трикотажа в компьютерной среде является одним из перспективных способов повышения уровня соответствия трикотажных изделий требованиям комфорта и функциональности. Однако сложность внутреннего строения, анизотропия свойств и неустойчивость параметров петельной структуры определяют необходимость поиска нетривиальных путей решения задачи математического описания трехмерной модели нити, провязанной в трикотаж, с учетом деформаций растяжения.

В ходе исследования разработана каркасная модель одноосного растяжения трикотажа вдоль петельных столбиков. В основе каркасной модели лежит представление о трикотаже как логически упорядоченном наборе элементов, каждый из которых связан с другими элементами в соответствии с топологией плетения. Каркас фрагмента трикотажа описывается как набор стержней и шарниров. Шарниры расположены в точках переплетения и игольной и платинной дуг, а каждый стержень в модели представляет собой воображаемый элемент, представляющий собой

комплекс силовых факторов, препятствующих изменению расстояния между петлями, соединенными этим стержнем.

Научная новизна. Впервые разработана каркасная модель деформации трикотажа, подходящая для трехмерного моделирования его структуры с учетом деформаций растяжения.

Практическая значимость. Разработанная модель может быть использована в качестве математического обеспечения автоматизированных систем проектирования трикотажных изделий.

Ключевые слова: трикотаж; каркасная модель; шарнирно-стержневая модель; деформации продольного растяжения.

YELINA T. V., HALAVSKA L. Ye., SHCHERBAN V. Yu., KOLISKO O. Z., BOBROVA S. Yu.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

FRAME MODEL OF UNIAXIAL STRETCHING OF WEFT-KNITTED STRUCTURES IN THE WALE DIRECTION

Purpose. The purpose of this study is to develop a frame model for stretching the weft-knits in the wale direction, suitable for further integration into the algorithm for building a three-dimensional knitwear model in a stretched state and modeling of interactive deformation dynamics.

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

Findings. Modeling the physical and mechanical behavior of knitwear in a computer environment is one of the promising ways to increase the level of conformity of knitted products with the requirements of comfort and functionality. However, the complexity of the internal structure, the anisotropy of properties and the instability of the parameters of the loop structure determine the need to find non-trivial ways to solve the problem of mathematical description of the three-dimensional model of the thread, knitted in the knitwear, considering the stretching deformations.

During the study, a frame model of a uniaxial stretching of knitwear in the wale direction was developed. The basis of the frame model is the idea of a knitted structure, represented as a logically organized set of elements, each of which is interlaces with other elements in accordance with the topology of knit. The frame of the jersey fragment is described as a set of bars and hinges. The hinges are located at the interlacing points of the loop heads and loop feet, and each rod in the model is an imaginary element representing a complex of force factors that prevent the change of distance between the hinges connected to the given rod.

In the process of stretching, the geometrical characteristics of the elements change, while the logical connections remain unchanged. The wireframe model allows to define coordinates of interlacement points in the coordinate system of the sample, relative position of coordinate systems of each elementary fragment, which correspond to given loops, coordinates of characteristic points of a loop for transition to a three-dimensional model of a knitted structure.

Scientific novelty. For the first time, a frame model of deformation of the knit, suitable for three-dimensional modeling of its structure, considering deformation of the thrust, was developed.

Practical value. The developed model can be used as mathematical support of systems of automated designing of knits.

Keywords: knitwear; frame model; hinge-rod model; tensile deformations.