

УДК 677.024

DOI 10.47367/0021-3497_2025_3_167

**РАСЧЕТ УРАБОТКИ НИТЕЙ В ТКАНЫХ АРМИРУЮЩИХ КАРКАСАХ
ГИБКИХ ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫХ РУКАВОВ**

**CALCULATION OF THREAD LOSS IN WOVEN REINFORCING FRAMEWORKS
OF FLEXIBLE FLAT-ROLLING SLEEVES**

С.Г. СТЕПАНОВ¹, Д.А. БУЛАНОВ², О.А. ДОДОНОВ³, Ю.С. КАБАНОВА³,
С.М. СТЕПАНОВА⁴

S.G. STEPANOV¹, D.A. BULANOV², O.A. DODONOV³, Y.S. KABANOVA³,
S.M. STEPANOVA⁴

¹Ивановский государственный энергетический университет,

²Ивановский государственный политехнический университет,

³АО «Ивхимпром»,

⁴Ивановский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова)

(¹Ivanovo State University of Energy,

²Ivanovo State Polytechnic University,

³JSC "Ivkhimprom",

⁴Ivanovo branch of the Russian University of Economics named after G.V. Plekhanov)

E-mail: step-sg@mail.ru

Проанализированы публикации по расчету уработки нитей в ткани. Предложен метод расчета уработки нитей в тканых армирующих каркасах переплетения саржа 1/2 гибких плоскосворачиваемых рукавов на основе исследования структуры ткани, полученной расчетной нелинейной математической модели ее строения и использования метода конечных разностей. Математическая модель строения ткани и ее конечно-разностный аналог получены для наиболее общего случая, когда на перемещения точек осевой линии нитей в элементе ткани переплетения саржа 1/2 не накладывалось каких-либо ограничений, поэтому они могут быть использованы для исследования строения любых однослойных тканей армирующих каркасов данного переплетения, в том числе и особо уплотненных как по основе, так и по утку. На их основе помимо таких параметров строения ткани, как высоты волн изгиба нитей основы и утка в элементе ткани, формы осевых линий нитей и их длины, силы давления между нитями, выполнен расчет уработки нитей в тканом армирующем каркасе гибкого плоскосворачиваемого

рукава. Исходными данными для расчета являлись геометрические плотности ткани по основе и утку, жесткостные характеристики нитей и ряд других показателей. Подтвержден высокий уровень соответствия расчетных и экспериментальных данных по уработке.

The publications on the calculation of thread wear in fabric are analyzed. A method for calculating the thread wear in woven reinforcing frames of 1/2 twill weave of flexible flat-rolled sleeves is proposed based on the study of the fabric structure, the obtained calculated nonlinear mathematical model of its structure and the use of the finite difference method. The mathematical model of the fabric structure and its finite difference analog are obtained for the most general case, when no restrictions were imposed on the displacement of the thread axial line points in the fabric element of 1/2 twill weave, so they can be used to study the structure of any single-layer fabrics of reinforcing frames of this weave, including those especially compacted both along the warp and along the weft. Based on them, in addition to such parameters of the fabric structure as the heights of the bending waves of the warp and weft threads in the fabric element, the shapes of the axial lines of the threads and their length, the pressure force between the threads, the calculation of the thread wear in the woven reinforcing frame of the flexible flat-rolled sleeve was performed. The initial data for the calculation were the geometric densities of the fabric by warp and weft, the rigidity characteristics of the threads and a number of other indicators. A high level of correspondence between the calculated and experimental data on the wear was confirmed.

Ключевые слова: гибкие плосковорачиваемые рукава, армирующий тканый каркас саржевого переплетения, уработка нитей.

Keywords: flexible flat-rolled sleeves, reinforcing woven twill frame, thread processing.

Уработка нитей в ткани оказывает большое влияние не только на ее строение и свойства, а также на расход сырья для выработки метра ткани. Поэтому точность определения уработки нитей имеет большое значение.

Наибольшее распространение получил способ, согласно которому значения уработки нитей (в %) получают, взяв отношение разницы между длиной распрямленной нити, вынутой из ткани, и длиной ткани к длине распрямленного отрезка нити с последующим умножением на 100%. Однако такой способ определения уработки предполагает наличие готовой ткани и не применим при проектировании.

Уработка зависит от ряда параметров: линейной плотности нити, формы ее поперечного сечения, вида сырья, переплетения, порядка фазы строения, геометрических плотностей по основе и утку, параметров

заправки и выработки ткани на ткацком станке, натяжения нитей в процессе ткачества и др.

Расчету уработки нитей в ткани при ее проектировании посвящено большое количество публикаций различных авторов. Условно публикации по расчету уработки нитей в ткани можно разбить на три группы. Наибольшую группу составляют публикации [1...18], в которых нити в ткани соответствуют модели идеальной нити с нулевой изгибной жесткостью, а уработка определяется исключительно с учетом геометрии взаимодействия двух систем нитей. Однако такие параметры строения ткани, как формы осевых линий нитей, их длины, высоты волн изгиба нитей в элементе ткани, которые определяют уработки нитей, зависят не только от натяжения нитей (для ткани на станке), их геометрических плотностей и ряда других факторов,

но и от изгибных жесткостей нитей. При переплетении основные и уточные нити взаимно изгибают друг друга, в результате чего получают волнообразное расположение. Изгиб обеих систем нитей продолжается до тех пор, пока не наступает полное равновесие. Поэтому изгибные жесткости нитей являются важными параметрами, в значительной степени определяющими всю геометрию нитей в элементе ткани. Учет изгибных жесткостей нитей безусловно необходим. Именно исходя из этих соображений появились публикации [19, 20] второй группы, в которых нити рассматриваются как тела, имеющие изгибные жесткости. Недостатком этих публикаций является то, что в их основу положена линейная теория изгиба для нитей с малыми прогибами, то есть для тканей малой и средней плотности. При проектировании тканей высокой плотности, с большими изгибными деформациями нитей линейная теория изгиба приводит к значительным погрешностям. К третьей группе публикаций [21...27] по расчету параметров строения тканей, в том числе и уработки, можно отнести работы, в основу которых положена нелинейная теория изгиба нитей. Данные публикации отражают наиболее общий случай, когда на перемещения точек осевой линии нитей не накладывалось каких-либо ограничений, поэтому нелинейная теория изгиба нитей может быть использована для исследования строения любых однослойных тканей главных переплетений, в том числе и особо уплотненных как по основе, так и по утку.

Получим основные теоретические положения для расчета уработки нитей в однослойных тканях переплетения саржа 1/2, так как именно из таких тканей производится подавляющее большинство армирующих каркасов гибких плоскостворачиваемых рукавов (ГПР).

В [25] на основе нелинейной теории изгиба нитей однослойных тканей получена математическая модель (4)...(12) взаимодействия нитей в тканом армирующем каркасе ГПР саржевого переплетения [25, рис. 1] при действии внутреннего гидравлического давления без учета слоев полиуре-

тана. Уравнения (4), (5) и (6), (7) полученной системы уравнений характеризуют равновесие рассмотренных отрезков соответственно уточной и основной нитей в элементе тканого армирующего каркаса саржевого переплетения. Уравнения (8), (9) представляют собой равенство усилий при взаимодействии нитей основы и утка в зонах контакта, (10), (11) – уравнения равенства нулю проекций сил на оси u , v соответственно для основной и уточной нитей. Уравнение (12) – основное геометрическое соотношение (условие совместности прогибов нитей) для тканей переплетения саржа 1/2, связывающее системы уточной и основной нитей. Уравнения (10) и (11) уже были использованы нами для прочностного расчета ГПР при действии внутреннего гидравлического давления [26]. Покажем, что на основе остальных уравнений математической модели [25, уравнения (4)...(9), (12)] при отсутствии внутреннего гидравлического давления ($q_{г\text{у}}=q_{г\text{о}}=0$) и натяжений нитей в краевых сечениях ($N_{O1}=N_{O2}=0$) для армирующих каркасов ГПР, снятых с круглоткацкого станка, могут быть определены такие параметры строения ткани, как уработки нитей, высоты изгиба нитей основы и утка, формы осевых линий нитей в ткани, длины нитей, сила давления между нитями, и другие параметры.

Аналитическое решение нелинейной математической модели строения ткани армирующего каркаса ГПР [25], включающей дифференциальные уравнения, интегральные и геометрические соотношения, в общем виде получить практически невозможно не только из-за структуры уравнений, но из-за неопределенности интервала интегрирования (длины деформированных осей отрезков нитей являются неизвестными величинами).

Для устранения этого недостатка перейдем от переменных ℓ и s к переменным Z и x (координаты по осям соответствуют [25, рис. 1]). Алгоритм перехода к новым переменным представлен в [27, с. 209...213]. Ниже приведены уравнения исходной системы [25, уравнения (4)...(9), (12)] в новых переменных:

$$A_y \left[\frac{d^3 \alpha}{dz^3} \cos^2 \alpha - 2 \frac{d^2 \alpha}{dz^2} \frac{d\alpha}{dz} \sin 2\alpha - \left(\frac{d\alpha}{dz} \right)^3 (1,5 \cos^2 \alpha - 1) \right] - \left[0,5 A_y \left(\frac{d\alpha}{dz} \right)_{z=0}^2 \right] \frac{d\alpha}{dz} + \frac{1}{\cos \alpha} q^y(z) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dz} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

$$A_0 \left[\frac{d^3 \varphi}{dx^3} \cos^2 \varphi - 2 \frac{d^2 \varphi}{dx^2} \frac{d\varphi}{dx} \sin 2\varphi - \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)^3 (1,5 \cos^2 \varphi - 1) \right] - \left[0,5 A_0 \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)_{x=0}^2 \right] \frac{d\varphi}{dx} + \frac{1}{\cos \varphi} q^o(x) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

$$q_{y1} d_o = q_{o1} d_y, \quad (5)$$

$$q_y d_o = q_o d_y, \quad (6)$$

$$y(q_{o1}) + v(q_{y1}) = 0,5 [\eta_{OB}(q_o) d_o + \eta_{yB}(q_y) d_y] + 0,5 [\eta_{OB}(q_{o1}) d_o + \eta_{yB}(q_{y1}) d_y]. \quad (7)$$

Функции, определяющие действие распределенных нагрузок, приложенных к от-

резкам основы и утка, в новых переменных имеют вид:

$$q^y(z) = q_y [1 - H(z - z_1) + H(z - z_6)] - q_{y1} [H(z - z_2) - H(z - z_3) + H(z - z_4) - H(z - z_5)], \quad (8)$$

$$q^o(x) = q_o [1 - H(x - x_1) + H(x - x_6)] - q_{o1} [H(x - x_2) - H(x - x_3) + H(x - x_4) - H(x - x_5)],$$

где $z_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ и $x_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ являются координатами по осям z и x , определяющими действие распределенных нагрузок.

Наиболее эффективным методом решения системы (1)...(7), по нашему мнению, является метод конечных разностей, который ранее уже нашел применение для расчета параметров строения тканей несаржевого переплетения [22...24].

Для решения системы (1)...(7) методом конечных разностей [28...30] введем конечно-разностную сетку на отрезках $3L_o$ и $3L_y$, разделив эти отрезки на n равных частей (n – четное). На рис. 1 показаны конечно-разностные сетки для отрезков основы (а) и утка (б) саржи 1/2.

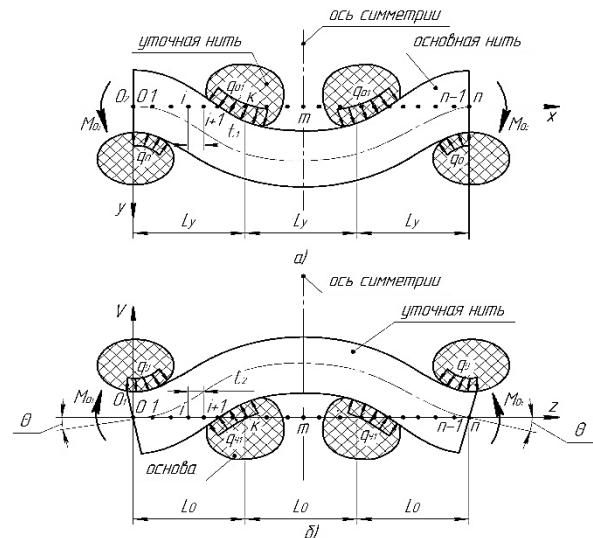


Рис. 1

Аппроксимируя первую, вторую и третью производные в уравнениях (1)...(4) центральными разностями [28...30], выполнив необходимые преобразования, опуская промежуточные выкладки (получение конечно-разностного аналога системы (1)...(4) приводится в [27, с. 215...223]), приходим к конечно-разностному аналогу системы (1)...(7), представляющему собой для отрезка основы

$$y_{m-3} = y_{m+3}; \quad y_{m-3} = 2h_1 \sum_{j=1,3,5,\dots}^{j=m-3} \operatorname{tg} \varphi_j; \quad y_{m+3} = 2h_1 \sum_{j=1,3,5,\dots}^{j=m+3} \operatorname{tg} \varphi_j; \quad (9)$$

$$\varphi_{m-1} = -\varphi_{m+1}; \quad (10)$$

для отрезка утка

$$v_{m-3} = v_{m+3}; \quad v_{m-3} = 2h_2 \sum_{j=1,3,5,\dots}^{j=m-3} \operatorname{tg} \alpha_j; \quad v_{m+3} = 2h_2 \sum_{j=1,3,5,\dots}^{j=m+3} \operatorname{tg} \alpha_j; \quad (11)$$

$$\alpha_{m-1} = -\alpha_{m+1}; \quad (12)$$

где $h_1 = \frac{3L_y}{n}$, $h_2 = \frac{3L_o}{n}$ – шаги конечно-

разностных сеток для отрезков соответственно основы и утка (рис. 1); m – номер узла, совпадающего с точкой пересечения

системы нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений. Поскольку такая система имеет множество решений, то для получения единственного решения, отвечающего условию симметрии деформированных осей нитей (рис. 1), учтем дополнительные ограничения, соответствующие этому условию:

осей симметрии отрезков основы и утка с осями O_1Z и O_2X .

С учетом наложенных дополнительных ограничений конечно-разностный аналог системы (1)...(7) принимает вид:

$$A_y \left[\frac{(\alpha_{i+2} - 2\alpha_{i+1} + 2\alpha_{i-1} - \alpha_{i-2})}{2h_2^3} \cos^2 \alpha_i - \frac{(\alpha_{i+1} - 2\alpha_i + \alpha_{i-1})(\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1})}{h_2^3} \sin 2\alpha_i - \frac{(\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1})^3}{8h_2^3} (1,5 \cos^2 \alpha_i - 1) \right] - \quad (13)$$

$$- \left[0,5A_y \frac{(\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1})^2}{4h_2^2} \Big|_{z=0} \right] \frac{(\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1})}{2h_2} + \frac{1}{\cos \alpha_i} q^y(z) = 0,$$

$$\frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{2h_2} = \operatorname{tg} \alpha_i, \quad (14)$$

$$A_o \left[\frac{(\varphi_{i+2} - 2\varphi_{i+1} + 2\varphi_{i-1} - \varphi_{i-2})}{2h_1^3} \cos^2 \varphi_i - \frac{(\varphi_{i+1} - 2\varphi_i + \varphi_{i-1})(\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1})}{h_1^3} \sin 2\varphi_i - \frac{(\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1})^3}{8h_1^3} (1,5 \cos^2 \varphi_i - 1) \right] - \quad (15)$$

$$- \left[0,5A_o \frac{(\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1})^2}{4h_1^2} \Big|_{x=0} \right] \frac{(\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1})}{2h_1} + \frac{1}{\cos \varphi_i} q^o(x) = 0,$$

$$\frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h_1} = \operatorname{tg} \varphi_i, \quad (16)$$

$$q_{y1} d_o = q_{o1} d_y, \quad (17)$$

$$q_y d_o = q_o d_y, \quad (18)$$

$$2h_1 \sum_{j=1,3,5,\dots}^{j=k-1} \operatorname{tg} \varphi_j + 2h_2 \sum_{j=1,3,5,\dots}^{j=k-1} \operatorname{tg} \alpha_j = 0,5 [\eta_{os}(q_o) d_o + \eta_{ye}(q_y) d_y] + \quad (19)$$

$$+ 0,5 [\eta_{os}(q_{o1}) d_o + \eta_{ye}(q_{y1}) d_y] \\ 2h_1 \sum_{j=1,3,5,\dots}^{j=m-3} \operatorname{tg} \varphi_j = 2h_1 \sum_{j=1,3,5,\dots}^{j=m+3} \operatorname{tg} \varphi_j; \quad (20)$$

$$2h_2 \sum_{j=1,3,5,\dots}^{j=m-3} \operatorname{tg} \alpha_j = 2h_2 \sum_{j=1,3,5,\dots}^{j=m+3} \operatorname{tg} \alpha_j; \quad (21)$$

$$\alpha_{m-1} = -\alpha_{m+1}, \quad (22)$$

$$\varphi_{m-1} = -\varphi_{m+1}, \quad (23)$$

где k – номер узла с координатами $x = L_y$ и $z = L_o$ по осям O_2X и O_1Z соответственно.
для отрезка утка

Граничные условия для решения системы (13)...(23):

$$\alpha_o = \theta; \alpha_{-1} = -\alpha_1 + 2\theta; \alpha_n = -\theta; \alpha_{n+1} = -\alpha_{n-1} - 2\theta; \quad (24)$$

$$v_o = z_o = 0; z_n = 3L_o; v_n = 0; v_{n+1} = v_{n-1} + 2h_2\theta;$$

для отрезка основы

$$\varphi_o = 0; \varphi_{-1} = -\varphi_1; \varphi_n = 0; \varphi_{n+1} = -\varphi_{n-1}; \quad (25)$$

$$y_o = x_o = 0; x_n = 3L_y; y_n = 0; y_{n+1} = y_{n-1},$$

где угол θ согласно [25] принимает значение (рад)

$$\theta = \frac{1,5L_o}{R + 0,5T}. \quad (26)$$

Следует отметить, что уравнения (1)...(4), (13)...(16) являются идентичными уравнениям (1)...(4), (9) статьи [23], так как получены на основе рассмотрения равновесия одного и того же элемента нити под действием внешних и внутренних сил [21], [27] при одних и тех же математических преобразованиях, хотя геометрические модели тканей разные (полотняное и саржевое переплетения), и системы уравнений отличаются лишь функциями, определяющими

действие распределенных нагрузок на отрезки нитей, видом геометрических зависимостей и граничными условиями для отрезка уточной нити. Так, в математических моделях (1...6), (9) статьи [23] используется основное геометрическое соотношение для тканей полотняного переплетения: сумма высот волн изгиба нитей основы и утка равна сумме диаметров нитей с учетом смятия (уравнение Новикова), а в данной статье уравнение (7) – геометрическое соотношение (условие совместности прогибов нитей) для тканей переплетения саржа 1/2, связывающее системы уточной и основной нитей. Подробный вывод геометрического соотношения (7) приводится в работе [27, с. 245...251]. Кроме того, в отли-

чие от [23] в граничных условиях для решения конечно-разностного аналога (13)...(23) учтены ненулевые значения угла наклона θ краевых поперечных сечений рассматриваемого отрезка уточной нити (рис. 1, б), обусловленные расположением тканого армирующего каркаса по окружности ГПР.

Уработки нитей тканого армирующего каркаса ГПР на основе саржи 1/2 по найденным значениям φ_i и α_i в результате численного решения системы (13)...(23) при граничных условиях (24), (25) с использованием компьютерных технологий определяются по следующим формулам:

для основы

$$a_o = \frac{l_{OH} - 3L_y}{l_{OH}} 100\%, \quad (27)$$

для утка

$$a_y = \frac{l_{yH} - 3L_o}{l_{yH}} 100\%, \quad (28)$$

где l_{OH} , l_{yH} – длины волн соответственно основной и уточной нити в элементе ткани (рис. 1), для которых имеем:

$$l_{OH} = h_1 \left(1 + \sum_{j=1,2,3,\dots}^{j=n-1} \frac{1}{\cos \varphi_j} \right), \quad (29)$$

$$l_{yH} = h_2 \left(\frac{0,5}{\cos \alpha_0} + \sum_{j=1,2,3,\dots}^{j=n-1} \frac{1}{\cos \alpha_j} + \frac{0,5}{\cos \alpha_n} \right). \quad (30)$$

Полученные формулы позволяют рассчитать уработку и необходимые длины при изготовлении тканых армирующих каркасов ГПР на основе саржи 1/2.

Система нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений (13)...(23) при граничных условиях (24), (25) может быть решена стандартными численными методами с использованием компьютерных технологий, в результате чего помимо уработки нитей могут быть определены такие параметры строения ткани армирующего каркаса ГПР, как высота изгиба нитей ос-

новы и утка, формы осевых линий нитей в ткани, их длины, сила давления между нитями, и другие.

Для численного расчета перечисленных параметров строения ткани необходимо знать геометрические плотности ткани по основе и утку, жесткостные характеристики нитей и ряд других исходных данных.

Перед тем как приступить к расчету уработки нитей и других параметров строения ткани армирующего каркаса ГПР, важно решить проблему верификации разработанных математических моделей – конечно-разностного аналога (13)...(23), граничных условий (24), (25), формул для уработки нитей (27)...(30).

Для верификации был использован тот факт, что деформированные изогнутые оси рассматриваемых взаимодействующих отрезков нитей (рис. 1) должны быть полностью идентичны при полном совпадении их исходных геометрических, жесткостных, силовых факторов и точек приложения последних. Система нелинейных уравнений (13)...(23) при граничных условиях (24), (25) для тканого армирующего каркаса из полиэфирных нитей на основе саржи 1/2 (номинальный диаметр ГПР – 150 мм) численно решалась с помощью пакета Mathcad 14 итерационным методом при следующих исходных данных: геометрические плотности ткани армирующего каркаса по основе и утку $L_o = L_y = 3,07$ мм; диаметры поперечных сечений основной и уточной нитей $d_o = d_y = 2,32$ мм; коэффициенты вертикального смятия нитей основы и утка $\eta_{ov} = \eta_{yv} = 0,59$; жесткости при изгибе основной и уточной нитей $A_o = A_y = 0,6223$ Н*мм²; угол $\theta = 0$; число элементов конечно-разностной сетки для отрезков нитей основы и утка $n = 18$; шаг конечно-разностной сетки для отрезков нитей:

$$t_1 = t_2 = \frac{3L_y}{18} = \frac{3L_o}{18} = 0,512 \text{ мм}. \quad (31)$$

В результате расчета определены текущие значения углов поворота плоскостей сечений основной и уточной нитей φ_i и α_i , а по ним рассчитаны координаты и высоты

волн изогнутых осей нитей, их длины, силы взаимного давления между нитями, уработки нитей. Все эти параметры строения ткани армирующего каркаса ГПР совпали вплоть до третьего знака после запятой, т. е. оказались идентичными для отрезков нитей и равными: высоты волн изгиба и длины деформированных осей соответственно 1,739 мм и 9,943 мм; силы взаимного давления между нитями 0,288 Н; уработки нитей 7,376%.

В качестве еще одного примера рассмотрим расчет уработки нитей и других параметров строения тканого армирующего каркаса на основе саржи 1/2 для номинального диаметра ГПР 150 мм, изготовленного из полиэфирных нитей [31]. Ткань данного каркаса, как и каркаса в предыдущем примере, относится к тканям повышенной плотности с большим изгибом основных нитей, поэтому использование для расчета уработки положений линейной теории изгиба нитей [19, 20] здесь неприемлемо, так как приведет к существенной погрешности [21, 24, 27]. Расчет уработки нитей в данном тканом армирующем каркасе и других параметров его строения выполнялся на основе конечно-разностного аналога (13)...(23), формул (27)...(30) при граничных условиях (24), (25) с помощью пакета Mathcad 14 итерационным методом при следующих исходных данных:

- 1) геометрические плотности ткани по основе $L_0=3,07$ мм и утка $L_y=7,14$ мм;
- 2) диаметры поперечных сечений нитей основы $d_0=2,32$ мм и утка $d_y=4,50$ мм;
- 3) коэффициенты вертикального смятия нитей основы $\eta_{ов}=0,59$ и утка $\eta_{уВ}=0,6$;
- 4) жесткости при изгибе нитей основы

$$A_0 = 0,6223 \text{ Н*мм}^2;$$

жесткости при изгибе нитей утка

$$A_y = 2,3413 \text{ Н*мм}^2;$$

- 5) толщина стенки ГПР $T=5$ мм;

- 6) угол

$$\theta = \frac{1,5L_0}{R + 0,5T} = \frac{1,5 \cdot 3,07}{75 + 0,5 \cdot 5} = 0,0594 \text{ рад};$$

- 7) число элементов конечно-разностной сетки для отрезков основы и утка – 18;

- 8) шаг конечно-разностной сетки для отрезка нити основы

$$t_1 = \frac{3L_y}{18} = 1,190 \text{ мм}; \quad (32)$$

для отрезка нити утка

$$t_2 = \frac{3L_0}{18} = 0,512 \text{ мм}. \quad (33)$$

В результате численного решения при приведенных выше исходных данных помимо прочих параметров определены значения углов поворота плоскостей сечений основной и уточной нитей ϕ_i и α_i . Величины уработок нитей основы a_0 и утка a_y в тканом армирующем каркасе ГПР, рассчитанные по формулам (27)...(30), имеют следующие значения:

$$a_0 = 10,95\%; a_y = 0,11\%.$$

Средняя уработка нитей в том же тканом каркасе, полученная экспериментальным способом, с доверительной вероятностью 0,95 составила

$$a_0^э = 10,51\%; a_y^э = 0,105\%.$$

Расхождение между экспериментальным и расчетным значением уработки составляет для нитей основы и утка соответственно 4,19 % и 4,76%.

На рис. 2 и 3 представлены кривые деформированных осей отрезков соответственно нитей основы и утка элемента ткани армирующего каркаса ГПР, построенные по результатам расчета.

Расчетные длины деформированных осей этих отрезков составили:

$$l_0^{pac} = 24,054 \text{ мм}; l_y^{pac} = 9,220 \text{ мм}.$$

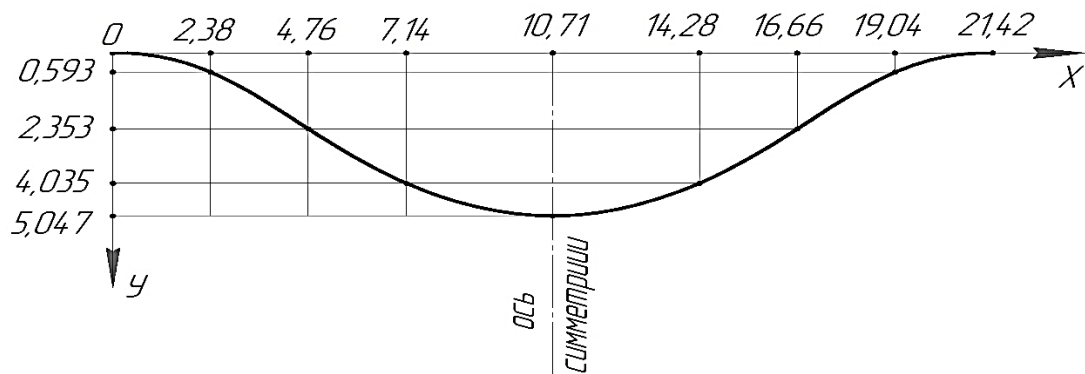


Рис. 2

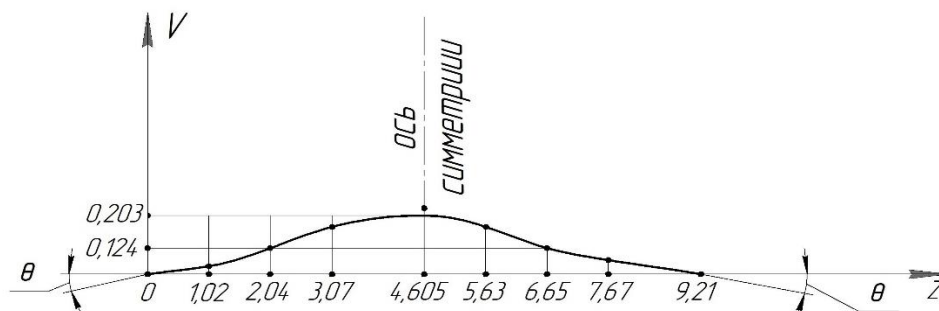


Рис. 3

Несоизмеримо большая уработка основы объясняется следующими причинами:

1) геометрическая плотность ткани армирующего каркаса по утку $L_y=7,14$ мм значительно больше (в 2,326 раза) геометрической плотности по основе $L_o = 3,07$ мм, или, если оперировать технологическими плотностями ткани по основе P_o и утку P_y , $P_o > P_y$;

2) нить основы имеет в 3,76 раза меньшую изгибную жесткость по сравнению с изгибной жесткостью нити утка.

В данном случае жесткость нитей на изгиб при равном сырьевом составе опосредованно характеризуется линейными плотностями нитей тканого армирующего каркаса ГПР: линейная плотность нити основы T_o существенно (в разы) меньше линейной плотности нити утка T_y , что характерно для тканых армирующих каркасов ГПР.

Из теории строения и проектирования тканей [32, 33] известно следующее положение: если линейная плотность нитей основы меньше линейной плотности нитей утка ($T_o < T_y$) и одновременно технологическая плотность ткани по основе больше тех-

нологической плотности ткани по утку ($P_o > P_y$), как в нашем случае, то на опорной поверхности ткани располагаются основные нити, что характеризуется большей величиной уработки нитей основы по сравнению с нитями утка. При этом, чем больше разница в значениях линейных плотностей нитей и технологических плотностей ткани, тем будет больше разница в значениях уработок нитей основы и утка. По нашему мнению, этим объясняется несоизмеримо большая уработка основной нити по сравнению с уточной в тканом армирующем каркасе ГПР.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика расчета уработки нитей и других параметров в тканых армирующих каркасах ГПР переплетения саржа 1/2 на основе численного решения методом конечных разностей полученной нелинейной математической модели строения ткани и выведенных зависимостей. Данный вид переплетения используется в подавляющем большинстве армирующих каркасов этих изделий, поэтому предло-

женный метод расчета применим к абсолютному большинству ГПР.

2. Конечно-разностный аналог и исходная математическая модель строения ткани армирующего каркаса на основе саржи 1/2 получены для наиболее общего случая, когда на перемещения точек осевой линии нитей в элементе ткани не накладывалось каких-либо ограничений, поэтому они могут быть применимы для исследования строения любых однослойных тканей армирующих каркасов ГПР из саржи 1/2, в том числе и особо уплотненных как по основе, так и по утку.

3. Выполнен расчет уработки нитей в тканом армирующем каркасе ГПР и подтвержден высокий уровень соответствия расчетных и экспериментальных данных по уработке. По результатам расчета построены кривые деформированных осей отрезков нитей основы и утка элемента ткани армирующего каркаса ГПР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Керимов С.Г. Расчет уработки и усадки нитей в тканых изделиях // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 1978. №5. С. 75...78.

2. Юхин С.С., Юхина Е.А. Методика расчета уработки нитей по параметрам заправки ткани на станке // Текстильная промышленность. 1990. № 8. С. 50...51.

3. Юхина Е.А., Юхин С.С. Расчет уработки нитей по заправочным параметрам ткани // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 1994. № 2. С. 36...38.

4. Сеницын В.А. Методика расчета уработки нитей в ткани с эффектом равномерной и переменной плотности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 1996. № 6. С. 44...48.

5. Воронин С.Ю., Быкадоров Р.В., Семеновых В.А. Расчет нормативного значения уработки основы на ткацком станке // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 1999. № 1. С. 56...60.

6. Степанов С.Г., Салихова А.Х., Степанов Г.В. Уработка нитей в сатинах // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2000. № 5. С. 51...56.

7. Мартынова А.А., Линяева Г.И. Расчет уработки нитей в тканях ажурного переплетения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2003. № 6. С. 46...49.

8. Юхина Е.А., Юхина О.С. Современные методы расчета уработки нитей в ткани // Известия

высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2004. № 1. С. 37...41.

9. Маховер В.Л., Семенова М.В., Корягин Е.П. Расчет уработки перевивочных нитей на пневматических ткацких станках ЗВ-8 // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2004. № 4. С. 36...38.

10. Маховер В.Л., Ленец О.П., Толубеева Г.И. Уточнение методики расчета уработки нитей в однослойной ткани // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2005. № 5. С. 30...33.

11. Ленец О.П., Маховер В.Л., Ефремов Д.Е. Расчет уработки нитей в однослойной суровой ткани по ее поверхностной плотности и изменение уработки при формировании ткани // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2006. № 1. С. 44...46.

12. Сеницына И.В. Прогнозирование величины уработки кромочных нитей в тканях, снятых со станка // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2008. № 2С. С. 67...70.

13. Маховер В.Л., Ленец О.П., Ефремов Д.Е. Об уработке нитей основы в ткани и в ткачестве // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2008. № 3. С. 52...56.

14. Сеницын А.В., Сеницына И.В., Николаев А.С. Расчет уработки нитей основы в кромках при использовании трехосных тканей // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2011. № 4. С. 69...73.

15. Толубеева Г.И., Якубова И.Г., Пятли С.Г. Методика расчета уработок нитей полотна по заправочным данным ткани и высоте волны изгиба основы // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2012. № 1. С. 54...58.

16. Толубеева Г.И. Пример расчета уработок нитей основы и утка и построение их профилей в ткани полотняного переплетения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2012. № 2. С. 53...58.

17. Толубеева Г.И. Методика расчета уработок нитей во фронтальной плоскости однослойной ткани по ее заправочным данным и высоте волны изгиба основы // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2012. № 3. С. 48...53.

18. Толубеева Г.И. Методика расчета уработок нитей в горизонтальной плоскости однослойной ткани по ее заправочным данным и высоте волны изгиба основы // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2012. № 5. С. 64...69.

19. Оников Э.А., Светлицкий В.А. Расчет показателей элементов ткани полотняного переплетения в опушке // Сб. науч. тр. ЦНИХБИ за 1964 г. М.: Легкая индустрия, 1966. С. 408...418.

20. Васильчикова Н.В. Расчет уработки нитей в ткани // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 1967. № 5. С. 86...92.

21. Степанов Г.В., Степанов С.Г. Теория строения ткани. Иваново: ИГТА, 2004. 492 с.

22. Степанов С.Г., Джаннапизова В.М., Мырхальков Ж.У. и др. Расчет параметров строения технической ткани для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2020. № 6. С. 113...118.

23. Степанов С.Г., Маслов Л.Б., Джаннапизова В.М. и др. Математическая модель строения технической ткани для армирования полимерных композиционных материалов и конечно-разностный аналог для расчета ее параметров // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 6. С. 279...285.

24. Степанов С.Г., Буланов Д.А., Джаннапизова В.М. и др. Методика расчета и проектирования технических тканей для армирования полимерных композиционных материалов с заданными характеристиками прочности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 6. С. 124...128.

25. Степанов С.Г., Буланов Д.А., Додонов О.А. и др. Развитие теории, разработка метода расчета гибких плосковорачиваемых рукавов при действии внутреннего гидравлического давления // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2024. № 4. С. 234...245.

26. Степанов С.Г., Буланов Д.А., Додонов О.А. и др. Прочностной расчет гибких плосковорачиваемых рукавов при действии внутреннего гидравлического давления // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 5. С. 231...239.

27. Мырхальков Ж.У., Сатаев М.И., Степанов С.Г., Чистобородов Г.И. Теория формирования и строения ткани на основе нелинейной механики гибких нитей и ее приложение к решению практических задач. Шымкент: ЮКГУ, 2014. 500 с.

28. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1973. 400 с.

29. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987. 600 с.

30. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1982. 448 с.

31. Степанов С.Г., Буланов Д.А., Додонов О.А. и др. Проверка соответствия расчетных и экспериментальных значений разрывных гидравлических давлений в гибких плосковорачиваемых рукавах // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2025. № 1. С. 268...274.

32. Мартынова А.А., Слостина Г.Л., Власова Н.А. Строеение и проектирование тканей. М.: МГТА, 1999. 435 с.

33. Толубеева Г.И. и др. Теория строения и проектирования тканей: основные положения и понятия: учебник. Иваново: ИГТА, 2012. 228 с.

REFERENCES

1. Kerimov S.G. Calculation of working out and shrinkage of threads in woven products // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 1978. No. 5. P. 75...78.

2. Yukhin S.S., Yukhina E.A. The method of calculating the processing of threads according to the parameters of fabric filling on the machine // Textile industry. 1990. No. 8. P. 50...51.

3. Yukhina E.A., Yukhin S.S. Calculation of thread processing by filling parameters of fabric // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 1994. No. 2. P. 36...38.

4. Sinitsyn V.A. Methodology for calculating thread processing in fabrics with the effect of uniform and variable density // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 1996. No. 6. P. 44...48.

5. Voronin S.Yu., Bykadorov R.V., Semenov V.A. Calculation of the normative value of working out the basis on a loom // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 1999. No. 1. P. 56...60.

6. Stepanov S.G., Salikhova A.Kh., Stepanov G.V. Processing threads in satins // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2000. No. 5. P. 51...56.

7. Martynova A.A., Linyaeva G.I. Calculation of thread processing in openwork fabrics // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2003. No. 6. P. 46...49.

8. Yukhina E.A., Yukhina O.S. Modern methods of calculating thread processing in fabric // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2004. No. 1. P. 37...41.

9. Makhover V.L., Semenova M.V., Koryagin E.P. Calculation of leno thread processing on ZB-8 pneumatic looms // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2004. No. 4. P. 36...38.

10. Makhover V.L., Lenets O.P., Tolubeeva G.I. Refinement of the methodology for calculating the working of threads in a single-layer fabric // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2005. No. 5. P. 30...33.

11. Lenets O.P., Makhover V.L., Efremov D.E. Calculation of thread processing in a single-layer harsh fabric based on its surface density and the change in processing during fabric formation // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2006. No. 1. P. 44...46.

12. Sinitsyna I.V. Forecasting the amount of edge thread work in fabrics removed from the machine. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2008. No. 2C. P. 67...70.

13. *Makhover V.L., Lenets O.P., Efremov D.E.* On the processing of warp threads in fabrics and weaving // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2008. No. 3. P. 52...56.
14. *Sinitsyn A.V., Sinitsyna I.V., Nikolaev A.S.* The calculation of warp threads run-in in edges using three-axial fabrics // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2011. No. 4. P. 69...73.
15. *Tolubeeva G.I., Yakubova I.G., Partli S.G.* The method of calculation of fabric threads run-in by fabric fettling data and height of a warp bend wave // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2012. No. 1. P. 54...58.
16. *Tolubeeva G.I.* An example of calculating the workings of warp and weft threads and constructing their profiles in plain weave fabric // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2012. No. 2. P. 53...58.
17. *Tolubeeva G.I.* Methodology for calculating thread workings in the frontal plane of a single-layer fabric based on its filling data and the height of the warp bending wave // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2012. No. 3. P. 48...53.
18. *Tolubeeva G.I.* Methodology for calculating thread workings in the horizontal plane of a single-layer fabric based on its filling data and the height of the warp bending wave // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2012. No. 5. P. 64...69.
19. *Onikov E.A., Svetlitsky V.A.* Calculation of the indicators of the elements of the fabric of plain weave in the edge: collection of scientific tr. TSNIHBI for 1964. M.: Light industry, 1966. P. 408...418.
20. *Vasilchikova N.V.* Calculation thread processing in fabric // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 1967. No. 5. P. 86...92.
21. *Stepanov G.V., Stepanov S.G.* Theory of tissue structure. Ivanovo: IGTA, 2004. 492 p.
22. *Stepanov S.G., Dzhanpaizova V.M., Myrkhal'kov Zh.U. etc.* Calculation of technical fabric structure parameters for the production of thermoplastic composite materials by abbreviated technology // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2020. No. 6. P. 113...118.
23. *Stepanov S.G., Maslov L.B., Dzhanpaizova V.M. etc.* Mathematical model of a technical fabric structure for reinforcement of polymeric composite materials and finite-difference analogue for calculation of its parameters // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2021. No. 6. P. 279...285.
24. *Stepanov S.G., Bulanov D.A., Dzhanpaizova V.M. etc.* Procedure for calculation and design of technical fabrics for reinforcement of polymeric composite materials with given strength characteristics // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Technology of the textile industry.* 2021. No. 6. P. 124...128.
25. *Stepanov S.G., Bulanov D.A., Dodonov O.A. etc.* Theory development, calculation method development of flexible flat hoses under the action of internal hydraulic pressure // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2024. No. 4. P. 234...245.
26. *Stepanov S.G., Bulanov D.A., Dodonov O.A. etc.* Strength calculation of flexible flat-folded hoses under internal hydraulic pressure // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2024. No. 5. P. 231...239.
27. *Myrkhal'kov Zh.U., Sataev M.I., Stepanov S.G., Chistoborodov G.I.* Theory of tissue formation and structure based on nonlinear mechanics of flexible filaments and its application to solving practical problems. Shymkent: SKSU, 2014. 500 p.
28. *Godunov S.K., Ryabenky V.S.* Difference schemes. Moscow: Nauka, 1973. 400 p.
29. *Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M.* Numerical methods. Moscow: Nauka, 1987. 600 p.
30. *Bate K., Wilson E.* Numerical methods of analysis and the finite element method. Moscow: Stroyizdat, 1982. 448 p.
31. *Stepanov S.G., Bulanov D.A., Dodonov O.A. etc.* Verification of compliance of calculated and experimental values of hydraulic bursting pressures in flexible flat-fold hoses // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2025. No. 1. P. 268...274.
32. *Martynova A.A., Slostina G.L., Vlasova N.A.* Structure and design of fabrics. Moscow: MGTA, 1999. 435 p.
33. *Tolubeeva G.I. et al.* Theory of structure and design of fabrics: basic principles and concepts: textbook. Ivanovo: IGTA, 2012. 228 p.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники ИВГПУ. Поступила 31.01.25.