

УДК 677.017.4

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ
СИНТЕТИЧЕСКИХ НИТЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
В УСЛОВИЯХ ИСПЫТАНИЙ
НА РЕЛАКСАЦИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

**THE RESEARCH OF VISCOELASTIC PROPERTIES
OF SYNTHETIC FIBRES SPECIAL PURPOSE
IN TESTING ON THE MECHANICAL STRESS RELAXATION**

П.Е. САФОНОВ, С.С. ЮХИН
P.E. SAFONOV, S.S. YUKHIN

**(ООО "ТЕКС-ЦЕНТР",
Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))
("TEKS-CENTRE",
(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))
E-mail: info@teks-centre.ru, office@msta.ac.ru**

В статье представлены результаты исследования по экспериментальному определению вязкоупругих свойств нитей специального назначения.

Испытания на релаксацию напряжений проведены на современном лабораторном оборудовании. Для ряда нитей впервые получены параметры ядра наследственной вязкоупругости А.Р. Ржаницина.

The paper presents the results of a study on experimental determination of the viscoelastic properties of yarns for special purposes. Tests stress relaxation conducted on the modern equipment. For a number of threads first obtained kernel parameters in hereditary viscoelasticity A.R. Rzhantsina.

Ключевые слова: вязкоупругие параметры, испытания на релаксацию, нити специального назначения.

Keywords: viscoelastic parameters, tests on a relaxation, threads of a special purpose.

Для успешного прогнозирования перерабатывающей способности нитей специального назначения, в том числе высокопрочных и высокомодульных, по переходам ткацкого производства необходимо располагать экспериментальными данными о таких их свойствах, как: разрывная нагрузка, удлинение и работа разрыва (полуцикловые свойства), стойкость к многократному растяжению, изгибу и истиранию (многоцикловые свойства), модуль упругости, размер и форма поперечного сечения, жесткость при изгибе и коэффициент тангенциального сопротивления. В то же время, важно знать, как ведут себя нити в условиях испытаний на длительную прочность при постоянном напряжении ($\sigma(t) = \text{const}$) или постоянной скорости нагружения ($\dot{\sigma}(t) = \text{const}$), а также в условиях релаксации механических напряжений при заданной постоянной величине деформации ($\varepsilon(t) = \text{const}$).

Из работ [1...3] известно о влиянии, которое оказывают релаксационные процессы, протекающие в нитях на ткацком станке, на условия формирования ткани. В частности, отмечается, что релаксационные процессы на ткацких станках с негативными основными регуляторами вызывают неравномерность натяжения основных нитей по ширине заправки станка (провисание в шпаруточной части) и связанную с этим повышенную обрывность в крайних зонах.

Однако для многих современных видов нитей, используемых для изготовления

тканей технического и специального назначения, отсутствуют данные об их релаксационных свойствах, что осложняет прогнозирование условий процесса ткачества.

Из работ [4], [5] известны некоторые вязкоупругие характеристики арамидных нитей. Установлено, что у всех нитей, полученных из жесткоцепных полимеров, процесс ползучести протекает неинтенсивно, а процесс релаксации напряжений для нитей Армос и СВМ имеет затухающий характер, интенсивное изменение величины напряжения происходит за первую минуту, а далее скорость затухания падает.

Цель настоящего исследования состоит в уточнении и определении вязкоупругих параметров для различных видов моно-, комплексных нитей и пряжи, используемых для изготовления технических тканей, что должно быть полезно при оценке их технологичности.

В работах проф. С.Д. Николаева и проф. В.П. Щербакова и их учеников [6...9] для описания процессов деформирования вязкоупругих нитей предложено использовать наследственную теорию Л. Больцмана (принцип суперпозиции), где зависимость между напряжениями и деформациями в интегральной форме имеет вид:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} \left[\sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \right], \quad (1)$$

$$\sigma(t) = E \left[\varepsilon(t) + \int_0^t \Gamma(t-\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \right], \quad (2)$$

где $\varepsilon(t)$ и $\sigma(t)$ – деформация и напряжение в момент времени t ; τ – время, предшествующее времени наблюдения; $t - \tau = \xi$ – прошедшее время; E – мгновенный модуль упругости; $K(t - \tau)$ и $\Gamma(t - \tau)$ – функции влияния (памяти), являющиеся ядрами уравнений (1) и (2) соответственно.

Для аналитической аппроксимации ядер интегральных уравнений в приложениях теории вязкоупругости используется

$$\Gamma(t) = \frac{Ae^{-\beta t^m}}{t^{1-\alpha}}, \left(0 < \alpha \leq 1, \beta > 0, m \geq \alpha, 0 \leq A < \frac{m\beta^{\alpha/m}}{\Gamma(\alpha/m)} \right), \quad (3)$$

где α, β, A, m – вязкоупругие параметры материала.

Частным случаем ядра М.А. Колтунова, при $m = 1$, является ядро А.Р. Ржаницина. Область допустимых значений выбранных параметров ядра обуславливается условием существования положительного равновесного модуля вязкоупругости:

$$E_\infty = E \left[1 - \frac{A\Gamma(\alpha/m)}{m\beta^{\alpha/m}} \right] > 0, \quad (4)$$

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 \left(1 - \int_0^t \Gamma(\xi) d\xi \right) = E\varepsilon_0 \left(1 - \int_0^t \frac{Ae^{-\beta\xi}}{\xi^{1-\alpha}} d\xi \right). \quad (5)$$

Для определения вязкоупругих параметров материала нити, входящих в выражение (5), воспользуемся методикой, разработанной на кафедре ПХОТИ в МГУДТ (Текстильный институт им. А.Н. Косыгина) [6]. Сущность методики заключается в фиксации нагрузки во времени при заданной постоянной деформации. Нить на разрывной машине доводится до заданной величины деформации $\varepsilon_0 \cong 1\%$. Для большинства высокопрочных и высокомодульных нитей это предельный уровень деформации в процессе текстильной переработки, далее машина останавливается и производится запись кривой релаксирующей нагрузки в координатах нагрузка (или напряжение) – время.

большое число различных функций скорости релаксации и ползучести [10...12]. В науке о текстильных материалах для описания релаксационных процессов широко используются слабосингулярные функции скорости релаксации, где за исходное резольвентное ядро принимается четырехпараметрическое ядро М.А. Колтунова:

где E_∞ и E – равновесный и мгновенный модули ($E_\infty \leq E$); $\Gamma(\alpha/m)$ – гамма-функция аргумента α/m .

При условии постоянной во времени деформации $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 = \text{const}$ уравнение релаксирующих напряжений записывается в виде (для случая использования ядра А.Р. Ржаницина):

Испытания проводили на машине Stati-graph L с подвижным верхним зажимом при максимальной скорости деформирования нити 800 мм/мин, данная разрывная машина позволяет записывать экспериментальные кривые релаксирующих напряжений в высоком качестве по сравнению с машинами типа FP-10/1 и FP-100/1, использованными для этих целей ранее.

Для примера на рис. 1 представлены кривые релаксирующей нагрузки для высокопрочной параарамидной нити Кевлар (рис. 1-а), нити сверхвысокомолекулярного полиэтилена – СВМПЭ (рис. 1-б) и углеродной нити (рис. 1-в), запись кривых проводилась при различных значениях деформации.

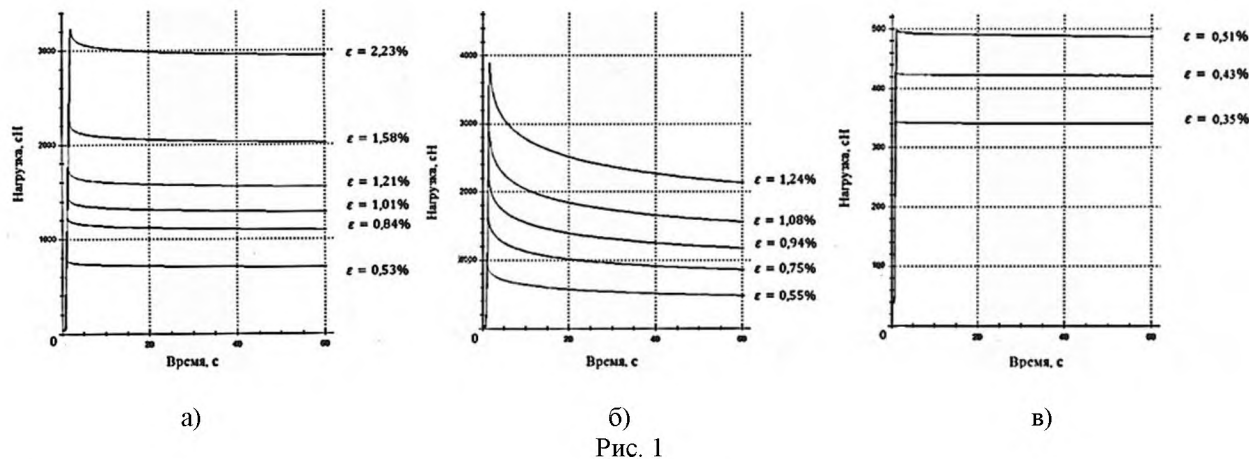


Рис. 1

Для идентификации параметров модели (5) можно воспользоваться выражениями, полученными проф. С.Д. Николаевым [6], или численными методами многомерной оптимизации, использованными проф. В.П. Щербаковым [7]. Наиболее простым представляется способ вычисления параметров материала нити α , β , A и мгновенного модуля E с использованием следующих четырех выражений, подробный вывод которых представлен в работах проф. С.Д. Николаева и его учеников:

$$t_1^\alpha (\sigma_2 - \sigma_3) - t_2^\alpha (\sigma_1 - \sigma_3) + t_3^\alpha (\sigma_1 - \sigma_2) = 0, \quad (6)$$

$$A = \frac{\alpha(\alpha + 1)(\sigma_1 - \sigma_2)}{\sigma_1(\alpha + 1)(t_2^\alpha - t_1^\alpha) + t_1^\alpha(\sigma_1 - \sigma_2)}, \quad (7)$$

$$E = \frac{\sigma_1(\alpha(\alpha + 1))}{\varepsilon_0[\alpha(\alpha + 1) + A t_1^\alpha]}, \quad (8)$$

$$\beta = \frac{\left[\sigma_4 - \sigma_1 + EA\varepsilon_0 \left(\frac{t_4^\alpha - t_1^\alpha}{\alpha} \right) \right]}{EA\varepsilon_0 \left(\frac{t_4^\alpha - t_1^\alpha}{\alpha + 1} \right)}, \quad (9)$$

где t_1, t_2, t_3, t_4 – моменты времени испытания, мин; причем t_1, t_2, t_3 выбираются в интервале от 0 до 0,5 мин, а t_4 – от 0,5 до 1 мин; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ – значения релаксирующих напряжений в соответствующие моменты времени, кгс/мм².

Напряжение, возникающее в нити или пряже, предложено определять из выражения:

$$\sigma = \frac{F\gamma}{T}, \quad (10)$$

$$k_{\text{рел}} = (E - E_\infty)/E.$$

где F – релаксирующая нагрузка, гс; T – линейная плотность нити, текс; γ – удельная плотность, для комплексной или мононити принимается удельная плотность вещества волокна, а для пряжи – фактическая плотность с учетом воздушных полостей, г/см³.

На рис. 2 представлены экспериментальные значения релаксирующих напряжений для арамидной нити линейной плотности 2,2 текс и кривая, которая получена путем аппроксимации экспериментальных данных в соответствии с моделью (5).

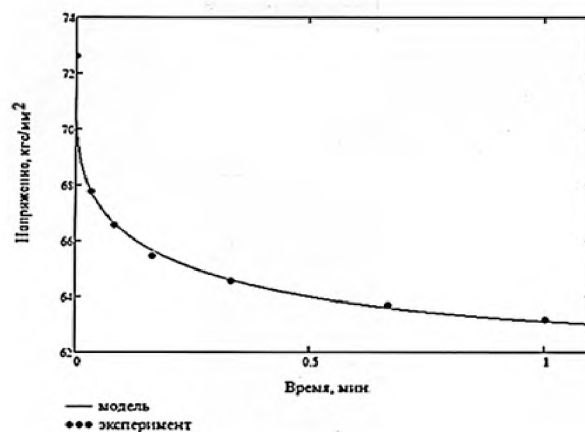


Рис. 2

В табл. 1 представлены экспериментально определенные при комнатной температуре значения вязкоупругих параметров для нитей различной структуры и природы. Коэффициент степени релаксации напряжений определяется следующим образом:

Таблица 1

Наименование нити	Показатели, характеризующие вязкоупругие свойства					
	α	β	A	модули, кгс/мм ²		$k_{\text{рел}}, \%$
				E	E_{∞}	
Мононити и микропроволоки						
Медная микропроволока ϕ 0,05 мм	0,307	0,837	0,043	6253,6	5390,1	13,8
Стальная микропроволока ϕ 0,035 мм	0,225	0,617	0,028	6493,7	5659,5	13,8
Полиэфирная мононить ϕ 0,034 мм	0,265	0,920	0,075	801,8	594,1	26,1
Полиамидная мононить ϕ 0,09 мм	0,319	0,987	0,147	407,0	239,3	41,8
Фторсодержащая мононить ϕ 0,09 мм	0,270	0,534	0,060	153,1	117,7	24,2
Комплексные высокопрочные и высокомодульные нити						
Параарамид Армалон 2,2 текс	0,231	0,690	0,033	7721,2	6588,7	14,7
Параарамид Армалон 8,0 текс	0,216	0,497	0,033	6104,5	5102,5	16,4
Параарамид Руслан 14,3 текс	0,278	0,677	0,027	9990,5	8878,1	11,4
Параарамид Руслан 29,4 текс	0,267	0,500	0,027	10941,5	9605,2	12,2
Параарамид РусарНТ 29,4 текс	0,313	0,667	0,017	14950,2	14086,8	5,7
Параарамид Кевлар 22 текс	0,316	0,903	0,041	9476,9	8334,7	12,1
Нить СВМПЭ 22 текс	0,310	0,677	0,172	3152,6	1433,1	55,9
Нить углеродная 30 текс	0,643	1,321	0,016	5727,7	5644,4	1,5
Комплексные среднечерные нити						
Нить Аримид 29,4 текс	0,315	0,681	0,028	1056,8	952,0	10,5
Нить Арселон 29,4 текс	0,283	0,447	0,051	1005,7	785,7	22,1
Метаарамидная нить 29,4 текс	0,295	0,668	0,037	1050,1	912,0	14,0
Полиамидная нить 29 текс	0,286	0,557	0,131	426,7	217,3	49,2
Полиэфирная нить 28 текс	0,306	0,393	0,038	1491,5	1266,4	16,3
Фторсодержащая нить 44,4 текс	0,206	0,702	0,079	352,1	219,2	37,9
Пряжа						
Пряжа Арселон 29 текс	0,327	0,569	0,065	225,9	177,4	21,8
Пряжа Протекс 30 текс	0,295	0,578	0,092	157,9	105,5	34,5
Метаарамидная пряжа 16,7 \times 2 текс	0,330	0,519	0,054	191,2	156,5	18,2

Для анализа и обобщения полученных данных построим кривые функции скорости релаксации $\Gamma(t)$ для нитей различной природы (рис. 3). При анализе данных табл. 1 и рис. 3 были сделаны выводы о том, что максимальная скорость релаксации напряжений наблюдается для нитей СВМПЭ, далее в порядке убывания скорости релаксации следуют полиамидные нити, фторсодержащие нити (Полифен, Тефлон, Фторин), полиэфирные нити, параарамидные нити, а минимальной скоростью релаксации отличаются углеродные нити.

Сравним значения параметров функции (3) для нитей с максимальной и минимальной скоростью релаксации напряжений. Параметр A для углеродных нитей является минимальным среди всех рассмотренных нитей, а параметры α и β – максимальными. Для нитей на основе СВМПЭ параметр A наоборот достигает максимального значения.

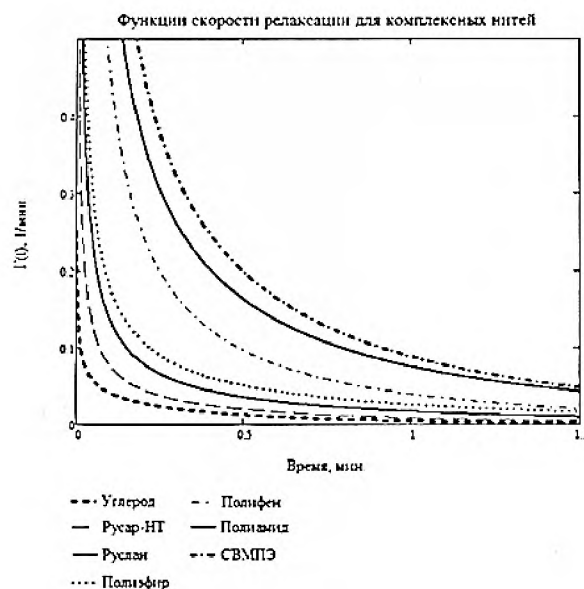


Рис. 3

По мнению авторов [6], [8], [9], большие значения модуля упругости и параметра α и небольшие для параметра A приведут к увеличению напряженности процесса тка-

чества (случай углеродных, арамидных и стеклонитей). Однако не ясно, насколько напряженными будут условия ткачества в случае высокого модуля упругости и высокого значения параметра A (случай нити СВМПЭ), при таком сочетании свойств нити на станке может наблюдаться ее провисание.

Установлено, что скорость релаксации напряжений в высокопрочных и высоко-модульных параарамидных нитях больше, чем в углеродных нитях, причем высоко-модульные нити Русар-НТ среди всех арамидных нитей имеют самую низкую скорость релаксации. Также было установлено, что коэффициент релаксации напряжений для арамидных нитей находится в пределах от 5,7 до 16,4%, а равновесный модуль находится в пределах от 51 до 141 ГПа.

Новые данные представляются более корректными, в отличие от данных, представленных в работе [4], в которой получено, что равновесный модуль арамидных нитей составляет 38...59 ГПа, а коэффициент релаксации напряжений составляет от 52 до 58%. Столь высокий коэффициент релаксации, как видно из данных табл. 1, свойственен для полиамидных и СВМПЭ нитей. Неточное определение равновесного модуля может быть следствием неправильно выбранного вида функции скорости релаксации (ядра интегрального уравнения).

Установлено, что скорость релаксации в параарамидных нитях Руслан сопоставима со скоростью релаксации в термостойких полиимидных нитях Аримид, несмотря на то, что модуль упругости данных нитей отличается на порядок.

Далее был сделан неожиданный вывод о том, что скорость протекания релаксационных процессов в полиэфирных и метаарамидных комплексных нитях лишь немногим больше, чем в параарамидных и полиимидных нитях. Таким образом, можно предположить, что условия переработки в ткачестве (при одинаковом температурно-влажностном режиме в цехе) комплексных пара-, метаарамидных, полиимидных и

полиэфирных нитей будут во многом схожи.

При сравнении параметров релаксационного процесса в нитях и пряжах одинакового волокнистого состава установлено, что в пряже скорость релаксации немного выше, что подтверждает выводы проф. С.Д. Николаева. При сравнении комплексных и монопнитей одинакового состава не удается сделать однозначный вывод об интенсивности релаксации. Металлические (сталь и медь) микропро-волоки имеют меньшую скорость релаксации, чем синтетические монопнити, и по скорости релаксации близки, скорее, к арамидным нитям.

Таким образом, в заключение можно отметить, что проведенное исследование позволило уточнить и проверить существующие представления о релаксационных процессах, протекающих в текстильных нитях различной природы. Точность определения параметров E , α , β , A может быть повышена при использовании современного испытательного оборудования и методов многомерной оптимизации, но это должно повлиять только на количественную сторону выводов, а не на их качество. Располагая данными об интенсивности протекания релаксационных процессов в нитях, используемых для изготовления технических тканей, можно более точно оценить напряженность заправки ткацкого станка. Однако переоценка влияния релаксационных процессов, происходящих на ткацком станке, также недопустима, так как напряженность процесса ткачества определяется всей совокупностью свойств и структурой перерабатываемых нитей, структурой ткани и конструктивными особенностями станка.

ВЫВОДЫ

1. В работе впервые с использованием современного испытательного оборудования определены и уточнены вязкоупругие параметры для специальных нитей различной природы, используемых для изготовления технических тканей, что создает пред-

посылки для оценки напряженности процесса переработки данных нитей в ткачестве.

2. Установлено, что максимальная скорость релаксации напряжений среди всех исследованных нитей наблюдается для нитей сверхвысокомолекулярного полиэтилена, а минимальная скорость релаксации наблюдается для углеродных нитей. Углеродные нити отличаются малым значением параметра A , который оказывает существенное влияние в течение всего времени релаксации, и большими значениями параметров α и β , которые оказывают влияние на начальном этапе релаксации и при затухании процесса соответственно. Нити сверхвысокомолекулярного полиэтилена отличаются максимальным значением параметра A .

3. Установлено, что скорость релаксации напряжений в высокопрочных и высокомодульных параарамидных и термостойких среднечерных полиимидных нитях сопоставима и выше, чем в углеродных нитях, но существенно меньше, чем в полиамидных или СВМПЭ нитях. При этом с точки зрения скорости протекания релаксационных процессов при комнатной температуре комплексные параарамидные, метаарамидные, полиимидные и полиэфирные нити во многом схожи, несмотря на различия в их модулях упругости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатырева М.С., Старинец И.В. Исследование релаксационных процессов в нитях основы на ткацком станке DORNIER HTV 6/SD 190 // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, № 4. С. 89...91.

2. Богатырева М.С., Старинец И.В. Исследование релаксации утка на рапирном ткацком станке // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, № 5. С. 51...54.

3. Плаксин Е.Б., Ступников А.Н., Тягунов В.А. Исследование натяжения основных нитей на ткацком станке после его останова // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2001, № 1. С.39...42.

4. Федорова С.В. Сравнительный анализ деформационных свойств арамидных нитей и текстильных материалов из них: Дис...канд. техн. наук. – СПб: СПбГУТД, 2010.

5. Кварацхелия В.А. Деформационные и прочностные свойства синтетических нитей технического назначения после предварительного деформирования: Дис... канд. техн. наук. – СПбГУТД, 2000.

6. Николаев С.Д., Мартынова А.А., Юхин С.С., Власова Н.А. Методы и средства исследования технологических процессов в ткачестве. – М.: МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2003.

7. Щербakov В.П., Скуланова Н.С. Основы теории деформирования и прочности текстильных материалов. – М.: МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2008.

8. Павлихина И.Ю. Разработка многослойных кремнеземных тканей разреженных структур: Дис... канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2012.

9. Слугин Алексей И. Разработка оптимальных технологических параметров изготовления тканей на основе вторичной арамидной пряжи: Дис...канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2008.

10. Фурьчева М.С. Вывод двухпараметрических ядер наследственности для описания деформационных свойств текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, № 1. С. 7...10.

11. Ржаницын А.Р. Теория ползучести. – М.: Госстройиздат, 1968.

12. Адамов А.А., Матвеев В.П., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Методы прикладной вязкоупругости. – Екатеринбург: УРОРАН, 2003.

REFERENCES

1. Bogatyreva M.S., Starinec I.V. Issledovanie relaksacionnyh processov v nitjah osnovy na tkackom stanke DORNIER HTV 6/SD 190 // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2012, № 4. S.89...91.

2. Bogatyreva M.S., Starinec I.V. Issledovanie relaksacii utka na rapirimom tkackom stanke // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2012, № 5. S. 51...54.

3. Plaksin E.B., Stupnikov A.N., Tjagunov V.A. Issledovanie natjazhenija osnovnyh nitej na tkackom stanke posle ego останова // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2001, № 1. S.39...42.

4. Fedorova S.V. Sravnitel'nyj analiz deformatsionnyh svojstv aramidnyh nitej i tekstil'nyh materialov iz nih: Dis...kand. tehn. nauk. – SPb: SPbGUTD, 2010.

5. Kvarachelija V.A. Deformatsionnye i prochnostnye svojstva sinteticheskikh nitej tehnicheskogo naznachenija posle predvaritel'nogo deformatsionirovanija: Dis... kand. tehn. nauk. – SPbGUTD, 2000.

6. Nikolaev S.D., Martynova A.A., Juhin S.S., Vlasova N.A. Metody i sredstva issledovanija tehnologicheskikh processov v tkachestve. – М.: MGTU im. A. N. Kosygina, 2003.

7. Shherbakov V.P., Skulanova N.S. Osnovy teorii deformatsionirovanija i prochnosti tekstil'nyh materialov. – М.: MGTU im. A. N. Kosygina, 2008.

8. Pavlihina I.Ju. Razrabotka mnogoslojnyh kremnezemnyh tkanej razrezhennyh struktur: Dis...kand. tehn. nauk. – M.: MGTU im. A.N. Kosygina, 2012.

9. Slugin Aleksej I. Razrabotka optimal'nyh tehnologicheskikh parametrov izgotovlenija tkanej na osnove vtorichnoj aramidnoj prjazhi: Dis...kand. tehn. nauk. – M.: MGTU im. A.N. Kosygina, 2008.

10. Furycheva M.S. Vyvod dvuhparametricheskikh jader nasledstvennosti dlja opisanija deformacionnyh svojstv tekstil'nyh materialov // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2000, № 1. S. 7...10.

11. Rzhanicyn A.R. Teorija polzuchesti. – M.: Gosstrojizdat, 1968.

12. Adamov A.A., Matveenko V.P., Trufanov N.A., Shardakov I.N. Metody prikladnoj vjazkoupugosti. – Ekaterinburg: UrORAN, 2003.

Рекомендована кафедрой проектирования и художественного оформления текстильных изделий РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 09.02.17.
