

ПРОЧНОСТЬ ХЛОПЧАТОБУМАЖНОЙ ПРЯЖИ ПРИ ЕЕ ДВИЖЕНИИ

STRENGTH OF COTTON YARN UNDER ITS MOTION

К.С.Султанов¹, С.И.Исмоилова², Ш.Э.Туланов²
 K.S.Sultanov¹, S.I.Ismoilova², Sh.E.Tulanov²

¹Институт механики и сейсмостойкости сооружений
 имени М.Т. Уразбаева, (г. Ташкент, Узбекистан)

²Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, (Узбекистан)

¹Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures
 after M.T. Urazbaev (Tashkent, Uzbekistan)

²Tashkent Institute of Textile and Light Industry (Uzbekistan)

E-mail: sultanov.karim@mail.ru, ismailova.sabida@mail.ru

На основе предложенного физически нелинейного закона деформирования хлопчатобумажной пряжи определена динамическая прочность пряжи в зависимости от ее скорости движения (скорости деформирования) и механических характеристик. Установлено, что увеличение скорости деформирования пряжи при ее растяжении приводит к увеличению прочности до 50%.

Ключевые слова: хлопчатобумажная пряжа; модули растяжения; скорость движения пряжи; скорость деформирования; механические свойства; прочность.

Based on the proposed physically nonlinear law of cotton yarn strain, dynamic strength of the yarn is determined depending on its rate of motion (strain rate) and mechanical characteristics. It is established that an increase in the strain rate of the yarn under extension leads up to 50% increase in strength.

Keywords: cotton yarn; tensile moduli; rate of yarn motion; strain rate; mechanical properties; strength.

Фундаментальные и прикладные вопросы определения, оценки и прогноза прочности текстильных нитей и пряж рассмотрены в [1-3]. Следуя идеям [1], в [4] проведены эксперименты по растяжению хлопчатобумажной пряжи (далее – пряжа) до обрыва, где измерялись значения растягивающей силы F , в сН и относительная деформация удлинения ε , в %. Полученные диаграммы растяжения пряжи $F(\varepsilon)$ являются экспериментальными законами деформирования пряжи. Используя опытные значения разрывного усилия в [5,6], определены также удельная разрывная прочность пряжи P_{II} в сН/текс для пряж с различными линейными плотностями.

На основе результатов экспериментов [4] и их анализа в [5] предложен физический нелинейный упруговязкопластический закон деформирования пряжи при ее растяжении до обрыва. На основе разработанного закона, получена формула для определения прочности пряжи при растяжении до обрыва, с учетом скорости ее деформирования [6].

Известно, что с увеличением скорости деформирования, при нагружении пряжи, сопротивление к растяжению волокнистого материала растет [7], следовательно, увеличивается прочность пряжи. Анализ существующих результатов экспериментов по динамическому нагружению различных нитей показывает, что сопротивление материала при увеличении скорости нагружения (скорости деформации) увеличивается от 1,1 до 4 раз [7]. Это обстоятельство требует разработки методов определения, оценки и прогноза прочности пряжи при ее движении в технологических процессах текстильного производства.

В [5] предложен физически нелинейный упруго-вязкопластический закон деформирования пряжи в виде

$$\frac{d\sigma}{E_D(\varepsilon)dt} + \mu(\varepsilon)\frac{\sigma}{E_S(\varepsilon)} = \frac{d\varepsilon}{dt} + \mu(\varepsilon)\varepsilon \quad \text{при} \quad \frac{d\varepsilon}{dt} > 0 \quad \varepsilon < \varepsilon_k \quad (1)$$

$$\sigma = 0 \text{ при } \varepsilon \geq \varepsilon_k$$

где σ – продольное растягивающее напряжение (далее напряжение); ε – продольная относительная деформация (далее деформация); t – время; $E_D(\varepsilon)$ – динамический модуль растяжения пряжи ($\frac{d\varepsilon}{dt} \rightarrow \infty$); $E_S(\varepsilon)$ – статический модуль растяжения пряжи ($\frac{d\varepsilon}{dt} \rightarrow 0$), эти модули являются функциями деформации ε ; $\mu(\varepsilon)$ – функция параметра вязкости пряжи, который связан с коэффициентом вязкости (внутреннего трения) пряжи соотношением

$$\mu = \frac{E_D(\varepsilon)E_S(\varepsilon)}{[E_D(\varepsilon) - E_S(\varepsilon)]\eta} \quad (2)$$

Предполагается, что $E_D(\varepsilon)/E_S(\varepsilon) = \gamma > 1$; ε_k – критическое значение деформации при которой пряжа обрывается и напряжение мгновенно падает до нуля; $\frac{d\varepsilon}{dt} = \varepsilon_t$ – скорость деформирования пряжи при растяжении.

При $\varepsilon = \varepsilon_k$, $t = t_k$, $\varepsilon_t = \frac{d\varepsilon}{dt} = const$ из (1) получена формула для определения удельной прочности пряжи [6] в следующем виде

$$P_{\Pi} = 0,0667 E_{Sk} (\varepsilon_{ik} + \mu_k \varepsilon_k) (1 - \exp(-\mu_k \gamma_k t_k)) / \mu_k \quad (3)$$

где E_{Sk} – значение функции $E_S(\varepsilon)$ при $\varepsilon = \varepsilon_k$, ε_{ik} – значение скорости деформирования пряжи ε_t при $t = t_k$, γ_k – значение γ при $\varepsilon = \varepsilon_k$, μ_k – значение μ при $\varepsilon = \varepsilon_k$.

Зависимость $E_S(\varepsilon)$, полученная из результатов экспериментов сложно нелинейная [5]. Она имеет 9 параметров, которые зависят от линейной плотности пряжи. Значения этих параметров определяются из соотношений, установленных на основе анализа опытных данных [4]. Методы определения параметров и функций уравнений (1), (3) приведены в [5-7].

Например, для уравнений (3) параметры E_{Sk} , ε_k и t_k определяются из соотношений

$$E_{Sk} = E_{kk} (T/T_S)^{\chi^5}, \quad \varepsilon_k = a_k + b_k T, \quad t_k = a_{ik} + b_{ik} T \quad (4)$$

где $E_{kk} = 2222,35$ МПа; $\chi^5 = -0,365873$; $a_k = 0,056204$; $b_k = 0,000453$ текс⁻¹; $a_{ik} = 3,578985$ с; $b_{ik} = 0,024199$ с/текс; T – линейная плотность пряжи; $T_S = 50$ текс – параметр обезразмеривания,

$$\gamma_k = \gamma_m + (\gamma_m - \gamma_N) (\varepsilon_{ik} / \mu_k)^\omega$$

$$\mu_k = \mu_N / \gamma_m \quad (5)$$

где γ_N – начальное значение γ при $\varepsilon_{ik} \rightarrow 0$; γ_m – максимальное значение γ при $\varepsilon_{ik} \rightarrow \infty$; $\omega = 0,1$; μ_N – начальное значение μ , а μ_k – значение μ при $\varepsilon = \varepsilon_k$.

Согласно анализу опытных данных [7], значения $\gamma_N = 1,1$; $\gamma_m = 4$.

Скорость движения пряжи на ткацких станках изменяется от 10 м/с до 40 м/с и более [8]. Учитывая, что скорость движения пряжи v и скорость деформирования ε_t связаны соотношением

$$v = l_0 \varepsilon_t \quad (6)$$

можно определить пределы изменения скорости деформирования, при базовой длине пряжи $l_0 = 0,5$ м, равными $\varepsilon_t = 5-80$ с⁻¹. В квазистатических опытах ε_t [4] скорость деформирования равнялась $\varepsilon_t = 0,015$ с⁻¹, при скорости движения пряжи $v = 0,0075$ м/с = 7,5 мм/с.

Как видно, в экспериментах достаточно низкая скорость движения пряжи по сравнению с движением на ткацких станках. Прочность пряжи определяется по уравнению (1), используя численный метод конечных разностей и по уравнению (3), непосредственным вычислением. Хорошее соответствие результатов расчетов по уравнениям (1) и (3) к опытным данным показано в [6]. Здесь рассмотрим влияние скорости деформирования на значение удельной прочности (в дальнейшем прочности) пряжи P_{II} при различных значениях линейной плотности T .

Для проведения расчетов по формуле (3) необходима скорость деформирования пряжи $\varepsilon_t = d\varepsilon/dt$. Значения которой определяется как $\varepsilon_t = \varepsilon_k / t_k$, с использованием соотношений (4). В этом случае скорость деформирования ε_t постоянная и прочность пряжи определяется приблизительно для одной точки диаграммы $F(\varepsilon)$.

Для определения прочности пряжи по формуле (1) задается изменение деформации по времени по линейному закону

$$\varepsilon = \varepsilon_t t, \quad \varepsilon_t = \varepsilon_k / t_k, \quad 0 \leq t \leq t_k \quad (7)$$

Далее с использованием метода конечных разностей уравнение (1) приводится к алгебраическому, и определяется значение σ для $0 \leq t \leq t_k$. Значение $\sigma = \sigma_k$ при $t = t_k$ и $\varepsilon = \varepsilon_k$ определяет прочность пряжи $P_{II} = 0,0667 \sigma_k$ в сН/текс. Главным отличием уравнений (1) и (3) от существующих методов (А.Н.Соловьева и других) является учет скорости деформирования пряжи при растяжении до обрыва ε_t и они основаны на интегральных параметрах, характеризующих механические свойства пряжи: E_D , E_S , μ , ε_k , t_k .

В расчетах по уравнению (1) изменения функции параметра вязкости $\mu(\varepsilon)$ принять в виде [7]

$$\mu(\varepsilon) = \mu_N \exp(-\alpha \varepsilon / \varepsilon_k), \quad \alpha = \ln(\mu_N / \mu_k) \quad (8)$$

Согласно (8) при растяжении пряжи значение μ уменьшается от μ_N до μ_k , соответственно значение η – коэффициента вязкости (внутреннего трения) – растёт.

В расчетах принято $\gamma_N = 1,1$; $\gamma_m = 2$; $\mu_N = 100 \text{ с}^{-1}$. Значения остальных параметров в (1), (3) определяются из соотношений (4)-(8).

Рассмотрим результаты расчетов. На рис.1 приведено изменение прочности в зависимости от линейной плотности пряжи. На этом рисунке кривые 1⁰-3⁰ получены по формуле (3), а кривые 1-4 по уравнению (1). Они относятся к скоростям деформирования $\varepsilon_t = 0,015 \text{ с}^{-1}$ (кривые 1⁰ и 1); $0,15 \text{ с}^{-1}$ (кривые 2⁰ и 2); $1,5 \text{ с}^{-1}$ (кривые 3⁰ и 3); 15 с^{-1} (кривая 4);

Как видно из рис.1, при низких скоростях деформирования, когда $\varepsilon_t = 0,015 \text{ с}^{-1}$ ($v = 7,5 \text{ мм/с}$), что соответствует условиям экспериментов [4], результаты по уравнениям (1) и (3) полностью совпадают. В этом случае, как показано в [6], эти кривые также удовлетворительно совпадают с результатами экспериментов [4].

Увеличение значения скорости деформирования в 10 раз (кривые 2⁰ и 2), приводит к увеличению прочности пряжи на 1-4% в зависимости от линейной плотности пряжи по формуле (1), а по формуле (3) – на 2-8%. Согласно результатам расчетов, при увеличении скорости движения пряжи на базе 0,5 м от $v = 75 \text{ мм/с}$, по формулам (1) и (3) прочность пряжи увеличивается в среднем на 1,5-6%. Однако, увеличение прочности по формуле (3) больше, чем по уравнению (1). Это объясняется тем, что по уравнению (1) учитывается процесс деформирования пряжи от $t=0$ до $t=t_k$, по формуле (3) этот процесс не учитывается. Влияние процесса нагружения (деформирования) на прочности материалов общеизвестно [7].

Дальнейшие результаты расчетов показывают, что с увеличением скорости деформирования прочность пряжи увеличивается в среднем на 17% (кривые 1 и 3), на 44% (кривые 1 и 4)

согласно уравнению (1). По формуле (3) увеличение прочности существенно выше (28% для кривых 1⁰ и 3⁰). Эти результаты показывают, что при низких скоростях движения пряжи, примерно до $v = 0,1$ м/с для определения прочности пряжи можно использовать формулу (3). При значениях скорости движения пряжи $v > 0,1$ м/с необходимо проведение расчетов по уравнению (1).

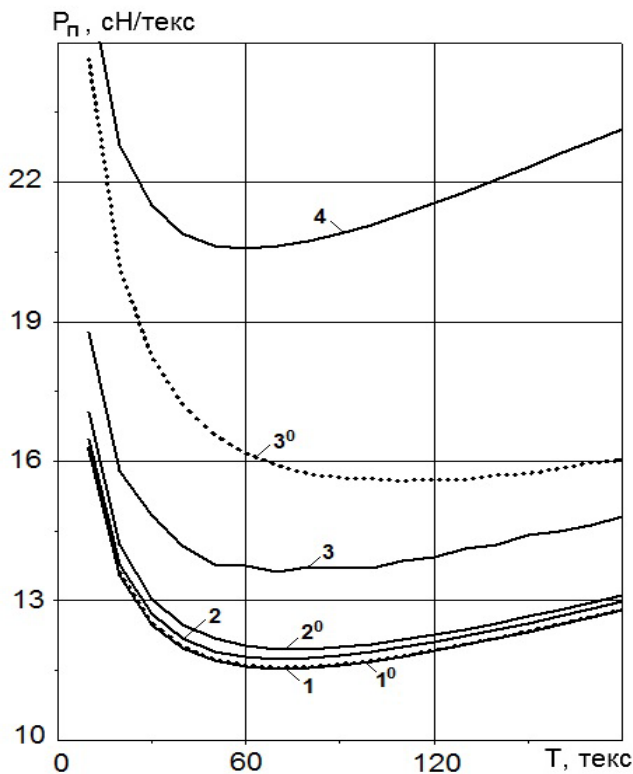


Рис.1 Изменение относительной прочности хлопчатобумажной пряжи при разных скоростях деформирования

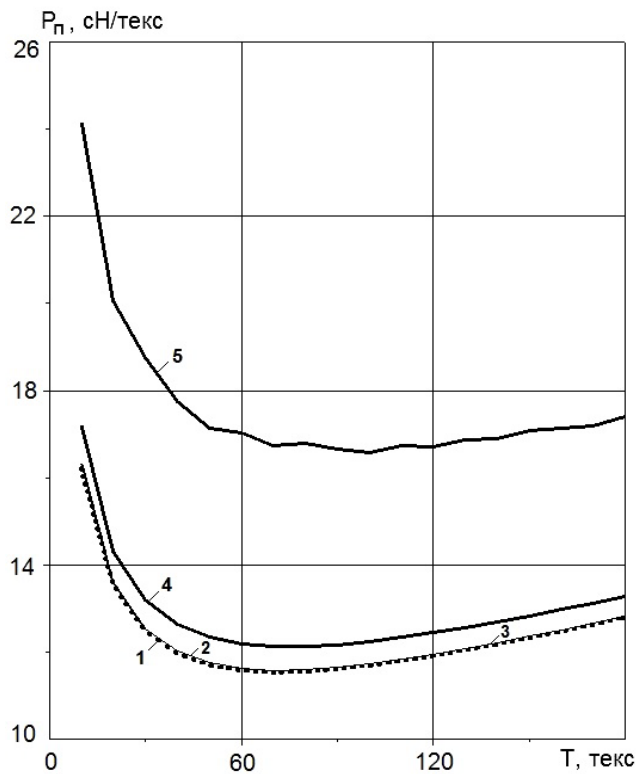


Рис.2 Влияние на относительную прочность хлопчатобумажной пряжи параметра γ

Скорость деформирования или скорость движения пряжи, согласно уравнениям (1), (3) влияет на ее прочность не только непосредственно через нагружение (7). Параметры γ и μ , которые характеризуют структурное изменение пряжи при растяжении, также могут влиять на значение ее прочности.

Изменение μ , согласно уравнению (8) зависит от начального значения этого параметра μ_N . Коэффициент вязкости (коэффициент внутреннего трения) недеформированной пряжи равен η_N или соответственно μ_N . Начальные и конечные значения γ_N и γ_m пряжи также влияют на текущее значение γ , которое определяется по формуле

$$\gamma = \gamma_m + (\gamma_m - \gamma_N) (\epsilon_{ik} / \mu(\epsilon))^{\omega} \quad (9)$$

По формулам (8) и (9) при постоянном значении скорости деформирования ϵ_t , в зависимости от значений параметров γ_N , γ_m и μ_N получатся разные значения прочности пряжи. Считаем, что начальное значение $\gamma_N = 1,1$ остается постоянным. Рассмотрим влияние на прочность пряжи параметров γ_m и μ_N . В зависимости от значения этих параметров, согласно (8) и (9), текущие значения μ и γ будут разными. Это означает, что разные пряжи в начале ее деформирования при $t=0$ и $\epsilon=0$ имеют разные структурные состояния, характеризующие значениями μ_N и γ_N . Также, разные пряжи в зависимости от скорости

нагрузки (деформирования), в процессе деформирования разрушаясь перед обрывом имеют разное γ_m .

На рис.2 приведены изменения прочности пряжи в зависимости от ее линейной плотности при различных значениях γ_m .

Кривые 1-3 получены соответственно для $\gamma_m = 1,5$; 2;4 при $\varepsilon_t = 0,015 \text{ с}^{-1}$. Как видно, при такой низкой скорости деформирования, изменения γ_m от 1,5 до 4 совершенно не влияет на значение прочности пряжи с любой линейной плотностью. Увеличение скорости деформирования в 10 раз, т.е. при $\varepsilon_t = 0,15 \text{ с}^{-1}$ при $\gamma_m = 4$, прочность пряжи увеличивается в среднем на 4-5% (кривая 4, рис.2). При скорости деформирования $\varepsilon_t = 1,5 \text{ с}^{-1}$, при $\gamma_m = 4$, прочность пряжи увеличивается на 30% по сравнению с кривой 3.

Параметр γ характеризует отношение динамического модуля деформации к статическому, т.е. E_D/E_S . При увеличении γ увеличивается E_D , т.е. динамическая прочность пряжи. Увеличение γ возможно при больших значениях γ_m или при меньших γ_N . Так как γ_N считается постоянной, в расчетах варьировали значением γ_m .

Параметр μ , зависящий от своего первоначального значения μ_N , характеризует внутреннее трение пряжи при ее деформировании. Внутреннее трение или объемная вязкость пряжи создается, прежде всего, кручением хлопковых волокон в пряже, чем больше степень крутки, тем больше внутреннее сопротивление пряжи при растяжении. В процессе деформирования при растяжении пряжи, согласно (8), значение μ уменьшается, следовательно, согласно (2) внутреннее сопротивление растет.

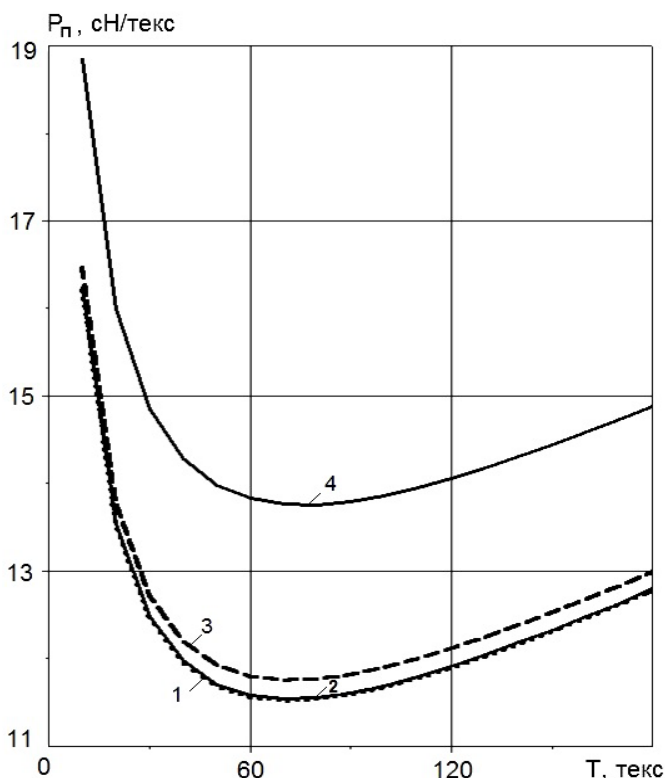


Рис.3 Влияние на относительную прочность хлопчатобумажной пряжи параметра объемной вязкости μ_N при скорости деформирования $\varepsilon_t = 0,015 \text{ с}^{-1}$

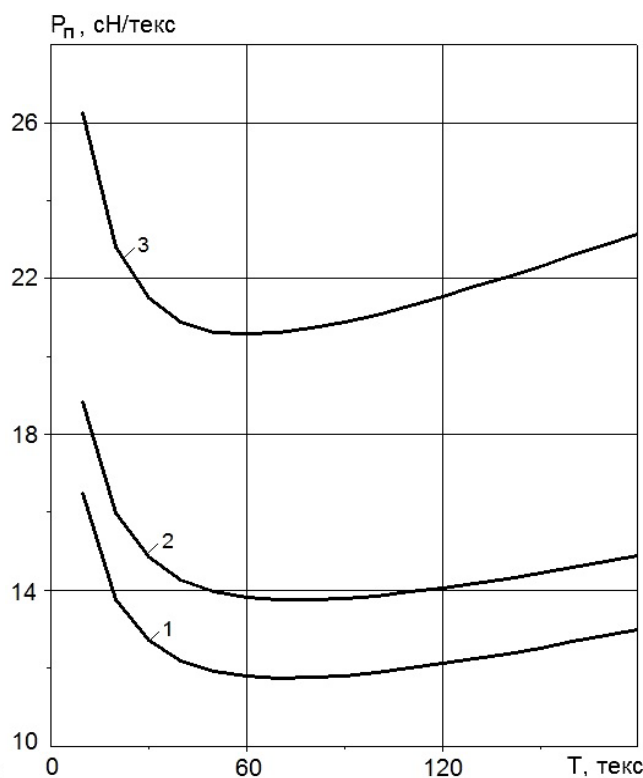


Рис.4 Влияние на относительную прочность хлопчатобумажной пряжи параметра объемной вязкости μ_N при скорости деформирования $\varepsilon_t = 0,15 \text{ с}^{-1}$

Степень этого роста зависит от значения μ_N . При $\varepsilon_t = 0,015 \text{ с}^{-1}$, $\gamma_N = 1,1$; $\gamma_m = 2$ и $\mu_N = 1000, 100, 10, 1 \text{ с}^{-1}$, изменение прочности пряжи показано на рис. 3. Как видно, при такой скорости деформирования, увеличение значения μ_N от 100 с^{-1} до 1000 с^{-1} не влияет на прочность пряжи (кривые 1 и 2). Уменьшение μ_N до 10 с^{-1} (кривая 3) приводит к увеличению прочности пряжи на 2-3%. Дальнейшее уменьшение значения μ_N до 1 с^{-1} приводит к увеличению прочности пряжи на 15-18% (кривая 4).

На рис.4 показано, что увеличение скорости деформирования на порядок $\varepsilon_t = 0,15 \text{ с}^{-1}$, при значениях $\mu_N = 100, 10, 1 \text{ с}^{-1}$, соответственно кривые 1-3, приводит к увеличению прочности пряжи в среднем на 14% , в случае кривых 1 и 2, на 40% в случае кривых 1 и 3.

Таким образом, определение прочности пряжи в зависимости от ее скорости движения в технологических процессах ткачества, возможно на основе закона деформирования (1). При скоростях движения $v \leq 0,1 \text{ м/с}$ динамическую прочность пряжи рекомендуется определять по упрощенной формуле (3).

Динамическая прочность пряжи существенно зависит от скорости движения пряжи и параметров $\gamma = E_D/E_S$ и μ , характеризующих структурное состояние пряжи. Параметры γ и μ определяют сопротивление пряжи к динамическим нагрузкам, возникающих при движении пряжи. Чем больше γ и меньше μ , тем больше динамическая прочность пряжи.

Динамическая прочность пряжи, с учетом скорости ее движения (скорости деформирования) в технологических процессах прядения, в зависимости от ее структурного состояния, может быть больше до 50% от ее статической прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щербаков В.П. Прикладная и структурная механика волокнистых материалов. – М.: Тисопринт, 2013. 304 с.
2. Morton W.E., Hearle J.W.S. Physical properties of textile fibers. Fourth edition. – Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008. 765 p.
3. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н. Текстильное материаловедение. Часть 2. – М.: Легкая индустрия, 1964. 380 с.
4. Султанов К.С., Исмаилова С.И., Туланов Ш.Э. Экспериментальные закономерности деформирования хлопковой пряжи при растяжении // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2016, №4 (364). С.63-67.
5. Султанов К.С., Исмаилова С.И., Туланов Ш.Э. Нелинейная упруговязкопластическая модель деформирования хлопковой пряжи при растяжении // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2016, №5 (365). С.109-115.
6. Султанов К.С., Исмаилова С.И., Туланов Ш.Э. Определение прочности хлопковой пряжи на основе нелинейной упруговязкопластической модели деформирования // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2018, №3 (375). С.95-101.
7. Султанов К.С., Исмаилова С.И. Структурная прочность текстильных нитей. – Ташкент: Фан, 2017. 256 с.
8. Алленова А.П. Автоматические ткацкие станки СТБ. М.: Легпромбытиздат, 1985. 288 с.