

УДК 677.017.43

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ОБРЫВА ХЛОПКОВОЙ ПРЯЖИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Султанов К.С., Исмоилова С.И., Хазратова Т.Я., Бегманов Р.А.

**abduazizovaguli1101@gmail.com*

Институт механики и сейсмостойкости сооружений имени М.Т. Уразбаева АН РУз,
100125, Узбекистан, Ташкент, Ул. Дурмон Йули, 40.

Работа посвящена комплексному исследованию процесса растяжения хлопковой пряжи до обрыва в условиях нелинейного деформирования. В качестве объекта исследования рассмотрена хлопчатобумажная пряжа линейной плотности $T=20$ текс. Экспериментальная часть выполнена на разрывной установке «Tenso Master» с постоянной скоростью растяжения (CRE) при варьировании скорости движения зажимов в диапазоне 100–5000 мм/мин и базовой длины деформирования L_0 в пределах 100–800 мм. По результатам испытаний анализируются разрывная нагрузка, удлинение при разрыве, время разрыва и выполненная работа, а также изучаются особенности в форме диаграмм $F(\varepsilon)$. Численная часть основана на нелинейной вязко-упругопластической постановке, описывающей распространение продольной растягивающей нагрузки вдоль пряжи, и реализована методом характеристик с неявной разностной схемой по подходу D.R. Hartree. Показано, что волновые процессы и многократные отражения возмущений от закрепленных концов могут приводить к колебательным компонентам скорости и напряжений, влияющим на устойчивость и механизм обрыва. Полученные результаты формируют экспериментально-теоретическую базу для параметрической идентификации моделей и прогноза обрыва хлопковой пряжи при различных режимах растяжения.

Ключевые слова: прочность, хлопковая пряжа, скорость движения, натяжение пряжи, разрывная машина “Tenso Master”, деформация, скорость деформирования, базовая длина, метод характеристик, волновой процесс.

Цитирование: Султанов К.С., Исмоилова С.И., Хазратова Т.Я., Бегманов Р.А. Комплексное исследование нелинейного деформирования и обрыва хлопковой пряжи при растяжении: эксперимент и численное моделирование // Проблемы механики. – 2026. – № 2(36). – С. 7-12.

1 Введение

Прочность является одним из ключевых свойств хлопчатобумажной пряжи и определяет надежность ее применения в технологических процессах текстильного производства и в эксплуатации готовых изделий. Экспериментальные исследования показывают, что при растяжении до обрыва хлопковые пряжи деформируются нелинейно, что связано с перестройкой структуры пряжи под нагрузкой (взаимным смещением волокон, изменением плотности и контактных взаимодействий) [1].

В литературе предложены физически нелинейные законы растяжения на основе подходов типа модели Эйринга, а также определены нелинейные зависимости квазистатического модуля деформации. Вместе с тем в ряде работ недостаточно исследовано влияние скорости деформирования, базовой длины и предварительного натяжения на механические характеристики и на особенности диаграмм растяжения,

включая наличие характерных участков с локальным изменением наклона («провал» модуля деформации) [2, 3].

Цель настоящей работы — экспериментально определить влияние скорости деформирования, базовой длины деформирования и предварительного натяжения на разрывные характеристики хлопковой пряжи, а также выполнить численный анализ процесса растяжения до обрыва на основе разработанной математической модели.

Исследовалась карда-кольцепрядельная хлопчатобумажная пряжа линейной плотности $T=20$ текс.

Экспериментальные исследования проводились на установке «Tenso Master», предназначенной для испытаний нитей и пряжи на растяжение до момента разрыва. Установка автоматически формирует результаты в виде графиков $F(\varepsilon)$ и таблиц числовых данных. Основные характеристики установки: грузоподъёмность 50 Н (возможны варианты 100 Н и 500 Н), принцип работы — постоянная скорость растяжения (CRE), диапазон удлинения — до 900%, автоматизированное пневматическое управление, выбор единиц измерения силы (гс, фунт-сила, кгс, Н, сН) и удлинения (% , мм, дюйм).

Скорость растяжения регулировалась в диапазоне 100–5000 мм/мин (изменение в 50 раз). Базовая длина деформирования L_0 устанавливалась в диапазоне 100–800 мм. Скорость деформирования пряжи определяется согласно формуле:

$$\varepsilon_v = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\vartheta}{L_0} \quad (1)$$

где скорость деформирования пряжи при ее растяжении; продольная деформация; ε_v скорость движения нижнего конца пряжи при растяжении; базовая длина пряжи при растяжении [4].

Для $L_0 = 100$ мм скорость деформирования изменялась от 0,0166 до 0,833 $^{-1}$, а для $L_0 = 800$ мм — от 0,002 до 0,1 $^{-1}$, что также соответствует изменению примерно в 50 раз. В ходе испытаний были определены: разрывная нагрузка, удлинение при разрыве, прочность на разрыв, время разрыва и выполненная работа.

Для теоретического исследования процесса растяжения и обрыва пряжи рассматривается задача о распространении продольной растягивающей нагрузки в нелинейной вязко-упругопластичной пряже. Результаты экспериментов [5–8] показывают, что хлопковые пряжи при растяжении до обрыва деформируются нелинейно. В работах [1, 4] на основе анализа результатов серийных экспериментов по растяжению хлопковой пряжи до обрыва, с использованием модели Эйринга (Ering), был разработан физический нелинейный закон растяжения пряжи.

$$E_D^{-1}(\varepsilon) \frac{d\sigma}{dt} + E_s^{-1}(\varepsilon) \mu(\varepsilon) \sigma = \frac{d\varepsilon}{dt} + \mu(\varepsilon) \varepsilon \quad (2)$$

где σ — продольное растягивающее напряжение; ε — продольная деформация пряжи при растяжении; t — время; $E_s(\varepsilon)$ и $E_D(\varepsilon)$ — соответственно переменные модули (функции) квазистатического (при $\frac{d\varepsilon}{dt} \rightarrow 0$) и динамического (при $\frac{d\varepsilon}{dt} \rightarrow \infty$) деформирования пряжи; $\frac{d\varepsilon}{dt}$ — скорость деформирования; $\mu(\varepsilon)$ — переменный параметр объёмной вязкости пряжи. Экспериментальное определение влияния скорости деформирования, базовой длины деформации и предварительного натяжения пряжи на функции $E_s(\varepsilon)$ осуществляется в настоящей работе. Рассмотрим задачу о распространении продольной растягивающей нагрузки в нелинейной вязкоупругопластической пряже, поведение которой при растяжении описывается уравнением (2).

Уравнения одномерного вдоль оси пряжи движения частиц пряжи в Лагранжевых координатах для нити (пряжи) при действии растягивающей нагрузки имеют вид:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

где v — скорость частиц пряжи; x — пространственная координата по оси пряжи; ρ_0 — начальная плотность пряжи. Решение задачи сводится к интегрированию системы уравнений движения, замкнутой законом деформирования, с граничными условиями на начальном сечении, где действует растягивающая нагрузка, и условиями на фронте волны в момент обрыва. Для решения системы уравнений используется метод характеристик. Принято, что фронты волн являются слабыми и не вызывают существенного разрушения структуры пряжи при распространении, поэтому характеристики остаются линейными, а характеристические соотношения — нелинейными из-за нелинейности функций модулей деформации и параметров вязкости [5, 6].

Вводятся безразмерные переменные, после чего характеристические уравнения записываются в разностном виде, что приводит к системе нелинейных алгебраических уравнений. Эти уравнения линеаризуются и решаются по неявной схеме с применением метода D.R. Hartree (по изложению Н.Е. Хоскин). На основе алгоритма разработана программа численного решения на языке FORTRAN-2005, зарегистрированная в Министерстве юстиции Республики Узбекистан (№ DGU 41720, 2024 г.).

Широкий диапазон скоростей растяжения и базовых длин деформирования, реализуемый на установке «Tenso Master», позволяет исследовать влияние скорости деформирования на процесс растяжения до обрыва. При изменении v и L_0 изменяется характерное время испытания и, следовательно, вклад релаксационных процессов и структурной перестройки пряжи.

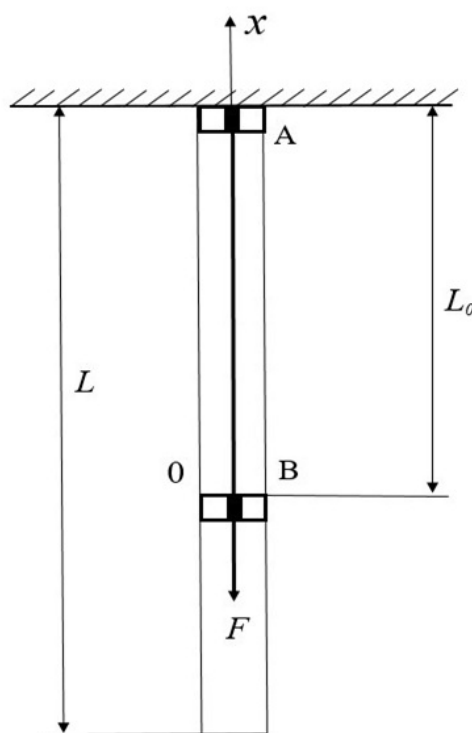


Рис. 1 Схема расчёта растяжения хлопковой пряжи, соответствующая её испытанию на обрыв на установке «Tenso Master»

Форма диаграммы $F(\varepsilon)$ отражает сложную внутреннюю структуру пряжи: на ранних стадиях деформации происходит относительное смещение волокон и их уплотнение, что приводит к изменению эффективного модуля деформации. В некоторых режимах наблюдается участок локального снижения наклона диаграммы (эффект «провала»), который, как показывают экспериментальные наблюдения, зависит от скорости деформирования и предварительного натяжения.

При наличии предварительного натяжения пряжа оказывается предварительно уплотнённой, что может уменьшать проявления структурной неустойчивости на начальном участке растяжения и придавать диаграмме более гладкий характер.

Численные эксперименты на основе нелинейной модели позволяют проследить распространение продольной нагрузки вдоль пряжи в виде волн возмущения. При задании закрепления одного конца и нагружения другого конца формируется волновой процесс с многократными отражениями от границ.

В качестве базового набора параметров использованы значения:

$$T = 20 \text{ текс}, \quad F_k = 260.0 \text{ сН}, \quad t_k = 0.15 \text{ с}, \quad E_D = 3375.0 \text{ МПа}, \quad L_0 = 100 \text{ мм},$$

$$v = 5000 \text{ мм/мин}, \quad \varepsilon_k = 0.007, \quad \varepsilon_e = 0.03,$$

$$\mu_n = 10000 \text{ с}^{-1}, \quad \mu_k = 1000 \text{ с}^{-1}, \quad \gamma_n = 1.1, \quad \gamma_m = \gamma_k = 3.0.$$

Данный набор рассматривается как исходный при анализе чувствительности результатов к изменениям параметров.

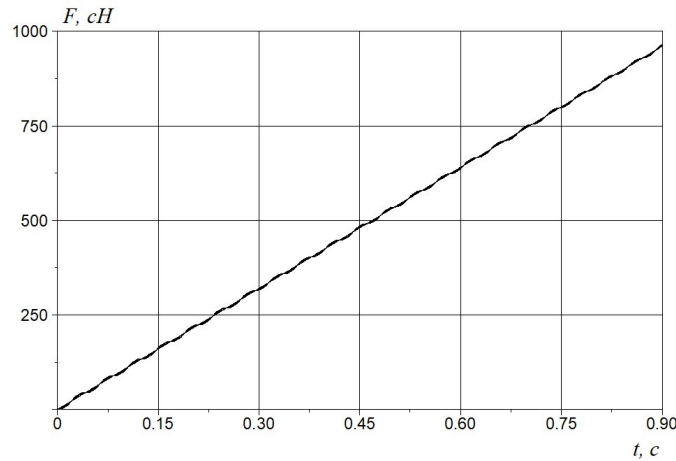


Рис. 2 Растягивающая сила в нелинейно деформируемой пряже при $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 90, 100$ см; $T = 20$ текс; $\varepsilon = 1.1$; $\mu = 3.0$; $L_0 = 100$ мм; $v_p = 5000$ мм/мин.

Расчёты показывают, что зависимость $F(t)$ в различных сечениях $x = 0-100$ см практически совпадает, что указывает на быстрое выравнивание продольной силы по длине. Вместе с тем присутствует слабая волнообразность $F(t)$, обусловленная волновыми отражениями и установлением динамического режима.

Скорость частиц пряжи в сечениях $v(x, t)$ имеет характер полусинусоиды: сначала возрастает до максимума, затем падает до нуля. Такая форма связана с тем, что на закреплённом конце скорость равна нулю (граничное условие), а отражённые волны влияют на кинематику во всех сечениях. Со временем амплитуда колебаний уменьшается, и процесс стремится к установившемуся режиму.

Нелинейность диаграмм растяжения по длине пряжи уменьшается с удалением от начального сечения приложения нагрузки. Это отражает переход волнового процесса к установлению. В линейном случае (при линейном законе деформирования) аналогичные диаграммы становятся линейными, что демонстрирует различие между линейным и нелинейным описанием [9, 10].

Изменение базовой длины деформирования влияет на частоту отражений волн и на распределение напряжений и скоростей вдоль пряжи. При малых L_0 отражения происходят чаще, что может усиливать колебательные эффекты. При увеличении длины пряжи изменения относительной деформации и скоростей в фиксированных сечениях становятся более стабильными, однако одновременно может увеличиваться диапазон колебаний скорости и их амплитуды из-за большего пути распространения возмущений.

Полученные результаты указывают на потенциальную роль резонансных явлений. Если частота колебаний напряжений по длине пряжи совпадает с частотой собственных колебаний пряжи, возможно развитие резонанса, сопровождающегося ростом амплитуд и ускорением разрушения. Это обстоятельство важно учитывать при прогнозе обрыва пряжи в динамических режимах.

2 Заключение

Экспериментально установлено, что процесс растяжения хлопковой пряжи $T=20$ текс до обрыва является нелинейным и чувствительным к скорости деформирования, базовой длине и предварительному натяжению. Установка «Tenso Master» обеспечивает режим CRE и позволяет варьировать скорость растяжения 100–5000 мм/мин и базовую длину 100–800 мм; при этом скорость деформирования $\varepsilon_v = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\dot{\vartheta}}{L_0}$ изменяется примерно в 50 раз. Численная модель и расчет методом характеристик выявляют волновую природу процесса растяжения и наличие колебательных составляющих в распределениях скорости и напряжений, связанных с отражениями волн от границ.

Литература

- [1] *Sultanov K. S., Ismoilova S. I., Begmanov R. A., Khazratova T. Ya.* Influence of Textile Yarn Velocity in Technological Processes on its Strength. — AIP Conference Proceedings, 2024, Vol. 3045, 040028.
- [2] *Sultanov K. S., Ismoilova S. I.* Strength of the Yarns at High Velocities of Their Motion in Technological Processes of Textile Production. — AIP Conference Proceedings, 2022, Vol. 2637, 030020.
- [3] *Ismoilova S. I.* Deterministic Method to Calculate the Strength of Cotton Yarns. — AIP Conference Proceedings, 2022, Vol. 2637, 030018.
- [4] *Sultanov K. S., Ismoilova S. I., Begmanov R. A., Khazratova T. Ya.* Influence of Textile Yarn Velocity in Technological Processes on its Strength. — AIP Conference Proceedings, 2024, Vol. 3045, 040028.
- [5] *Sultanov K. S., Ismoilova S. I.* Physically Nonlinear Elastic-Viscoplastic Law of Cotton Yarn under Tension to Breakage. — Journal of Fashion Technology and Textile Engineering, 2017, Vol. 5, No. 4, pp. 10–18.
- [6] *Ismoilova S. I., Sultanov K. S.* Nonlinear Deformation Laws for Composite Threads in Extension. — Mechanics of Solids, 2015, No. 5, pp. 578–592.
- [7] *Sultanov K. S., Ismailova S., Baymuratov B., Tulanov Sh.* Experimental Determination of Cotton Yarn Strength at Different Speeds of Movement Obtained by Various Technological Methods. — E3S Web of Conferences, 2021, Vol. 304, 03027.

- [8] *Султанов К. С., Исмоилова С. И.* Структурная прочность текстильных нитей. — Ташкент: Фан, 2017. — 256 с.
- [9] *Guo M., Wang J., Gao W.* A Novel Test Method of Load-Bearing Performance of Sized Warp Yarn Based on Weaving Load Simulation and Its Effectiveness. — Textile Research Journal, 2023, Vol. 93, No. 11–12, pp. 2809–2823.
- [10] *Liu Y., Feng Z., Lv F., Wang G.* An Improved Dynamic Model and Numerical Simulation of Yarn in the Ring Spinning System. — Textile Research Journal, 2022, Vol. 93, No. 9–10, pp. 2175–2190.

UDC 677.017.43

COMPREHENSIVE STUDY OF NONLINEAR DEFORMATION AND BREAKAGE OF COTTON YARN UNDER TENSION: EXPERIMENT AND NUMERICAL MODELING

Sultanov K.S., Ismoilova S.I., Khazratova T.Y., Begmanov R.A.

*abduazizovaguli1101@gmail.com

Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan Institute of Mechanics and Seismic Stability
of Structures 40, str.Durman yuli, Tashkent, 100125, Uzbekistan.

This work is dedicated to a comprehensive study of the cotton yarn stretching process until breakage under nonlinear deformation conditions. The object of research is cotton yarn with a linear density of $T=20$ tex. The experimental part was conducted on a «Tenso Master» tensile testing machine with constant rate of extension (CRE), varying the clamp movement speed from 100 to 5000 mm/min and the gauge length L_0 within 100–800 mm. Based on the test results, the breaking load, elongation at break, time to break, and work performed are analyzed, and the features of the $F(\varepsilon)$ diagrams are examined. The numerical part is based on a nonlinear viscoelastic-plastic formulation describing the propagation of longitudinal tensile load along the yarn, and is implemented using the method of characteristics with an implicit difference scheme following D.R. Hartree's approach. It is shown that wave processes and multiple reflections of disturbances from the fixed ends can lead to oscillatory components of velocity and stress, affecting the stability and breaking mechanism. The obtained results form an experimental-theoretical basis for parametric identification of models and prediction of cotton yarn breakage under various stretching regimes.

Keywords: Strength, cotton yarn, movement speed, yarn tension, “Tenso Master” tensile testing machine, deformation, strain rate, gauge length, method of characteristics, wave process.

Citation: Sultanov K.S., Ismoilova S.I., Khazratova T.Y., Begmanov R.A. 2026. Comprehensive study of nonlinear deformation and breakage of cotton yarn under tension: experiment and numerical modeling. *Problems of mechanics*. 2(36):7-12.