

Научная статья

УДК 677.022 : 519.876.5

EDN UVK VYI

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-4-70-23-29>

Петр Алексеевич Севостьянов¹

Татьяна Алексеевна Самойлова²

Наталья Викторовна Минаева³

^{1,2,3}Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),

Москва, Россия

¹ petrsev46@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9919-5551>

² tasamo89@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2727-0011>

³ minaeva-nv@rguk.ru; <https://orcid.org/0009-0008-4765-0461>

ВЛИЯНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАЗБРОСА ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОН НА ДИНАМИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ПРЯЖИ

Аннотация. Выполнен анализ динамики удлинения пряжи из натуральных слабо извивных волокон (хлопок, лен) и близких к ним по свойствам химических волокон с применением метода статистической имитации. Исследовано влияние неравномерности волокон по разрывному удлинению и нагрузке, длине, тонине, кручению, расположению в поперечных сечениях и по длине пряжи на неравномерность и динамику удлинения и разрыва пряжи. Показаны преимущества метода статистической имитации динамики перед экспериментами с реальными образцами пряжи.

Ключевые слова: пряжа, волокна, удлинение, разрыв, статистическая динамика, статистический разброс, аппроксимация, нелинейная регрессия

Для цитирования: Севостьянов П. А., Самойлова Т. А., Минаева Н. В. Влияние статистического разброса характеристик волокон на динамическую прочность пряжи // Технологии и качество. 2025. № 4(70). С. 23–29. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-4-70-23-29>.

Original article

Petr A. Sevostyanov¹

Tatiana A. Samoilova²

Natalia V. Minaeva³

^{1,2,3} Kosygin State University of Russia (Technology. Design. Art), Moscow, Russia

INFLUENCE OF STATISTICAL VARIATIONS OF FIBRE CHARACTERISTICS ON DYNAMIC STRENGTH OF YARN

Abstract. The analysis of the dynamics of yarn elongation from natural slightly crimped fibres (cotton, flax) and chemical fibres with properties close to them was performed using the statistical simulation method. The influence of unevenness of fibre's breaking elongation and load, length, fineness, twisting, location in cross sections and along the yarn on the unevenness of the dynamics of yarn elongation and breakage was studied. The advantages of the statistical simulation of dynamics method over experiments with real yarn samples were shown.

Keywords: yarn, fibres, elongation, rupture, statistical dynamics, statistical variances of characteristics, approximation, nonlinear regression

For citation: Sevostyanov P. A., Samoilova T. A., Minaeva N. V. Influence of statistical variations of fibre characteristics on dynamic strength of yarn. Technologies&Quality. 2025. No 4(70). P. 23–29.(InRuss.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-4-70-23-29>.

Современные разрывные приборы оснащены автоматикой регистрации не только итогов испытания [1] – разрывной нагрузки P_b , раз-

рывного удлинения S_b и продолжительности испытания T_b , но и значений нагрузки P и удлинения S для каждого момента времени испытания t . Результатом такого испытания являются таблица числовых значений и графики зависимостей $P(t)$, $S(t)$ и $P(S)$.

При испытании нити, произведенной из элементарных нитей с одинаковыми механическими характеристиками, получаемые зависимости практически точно, с точностью до масштабных множителей, повторяют аналогичные зависимости для этих нитей.

При испытании пряжи, произведенной из химических волокон с одинаковыми длиной, тониной и механическими характеристиками, различия в получаемых кривых при испытании нескольких образцов наблюдаются только на завершающей стадии, когда волокна образца уже не столько удлиняются, сколько скользят или разрываются под действием удлинения. Причина различия при одинаковых свойствах и отображающих эти свойства характеристиках – статистический разброс в строении и структуре попечерных сечений образцов.

При испытании пряжи из волокон с заметным разбросом геометрических и механических характеристик (а таковыми являются все натуральные и многие химические волокна) зависимость $P(S)$ заметно отличается от аналогичной зависимости для одиночных волокон. При этом прочность пряжи меньше суммарной прочности волокон в сечениях и определяется не только и не столько прочностью самих волокон, сколько их взаимодействием, которое усиливается благодаря кручению волокон вокруг оси пряжи. Кручение обеспечивает большую площадь прилегания волокон друг к другу и большую силу прижима в областях прилегания. Соответственно, возрастает и сопротивление относительному смещению волокон. На этапе разрыва пряжи происходит, главным образом, расщепление волокон, скольжение их друг по другу. Разрываются лишь наиболее слабые волокна.

На основе приведенных представлений Е. Брашлер [2], П. П. Трыков [3], А. Н. Соловьев [4], В. И. Будников с соавт. [5] разработали теорию взаимодействия волокон в теле пряжи. Компактно основные соотношения, вытекающие из этой теории, изложены А. Г. Севостьяновым [6]. Дальнейшее развитие этот подход получил в диссертации Ю. К. Бархоткина [7]. Предложенная этими авторами модель рассматривала задачу в статике и не учитывала статистический разброс характеристик волокон, строения и структуры пряжи.

Используя метод компьютерной статистической имитации, П. А. Севостьянов [8–10] предложил компьютерную модель статистической имитации, описывающую динамику развития деформации в образце пряжи с увеличением ее удлинения. Открылась возможность отследить детали развития деформации, распределение

напряжений при удлинении и разрыве образца во времени с учетом статистического разброса характеристик структуры и строения пряжи и образующих ее волокон во времени. В модели учитывались не только динамика изменения сопротивления пряжи нагрузке, но и статистический разброс характеристик волокон и структуры пряжи и их изменения в процессе деформации образца. Модель была использована в ряде исследований [9–13].

Перечислим учтенные в модели характеристики волокон и структуры пряжи. Это распределения волокон по длине l , тонине s , разрывной нагрузке P_b , относительному разрывному удлинению ε_b , функциональной зависимости напряжения от деформации, масштабируемой для каждого волокна под его P_b и ε_b , коэффициенты трения и сцепления между волокнами. Структура пряжи описывается распределениями расстояний центров сечений волокон от центральной оси пряжи, коэффициента крутки и распределениями величины фактической крутки каждого из волокон в сечении пряжи по винтовым линиям, распределениями интервалов между передними концами волокон вдоль длины образца. Для каждого из перечисленных распределений задаются в качестве параметров среднее, коэффициент вариации, минимальное и максимальное возможное значение. Модель допускает возможность имитации удлинения пряжи из смеси разнородных волокон и комбинированной пряжи.

Детально алгоритм работы модели – имитатора удлинения и разрыва пряжи и его программная реализация описаны в литературе [9, 10]. Ниже приведена обобщенная структура алгоритма:

1. Задание «базовых» параметров моделируемого образца: тонина пряжи, текс; крутка, кручений на метр; средняя длина и тонина волокон. Выбор типов распределений для перечисленных выше характеристик.

2. Расчет дополнительных параметров пряжи, например, среднего диаметра и среднего числа волокон в сечении; параметров используемых распределений длины, тонины, разрывного удлинения волокон и проч.

3. Генерация числовых значений характеристик волокон и структуры по выбранным распределениям. Вычисление начальной прочности пряжи с учетом сил нормального давления между волокнами вследствие начальной крутки пряжи, сил сцепления и трения между волокнами.

4. Создание «контейнеров» в памяти ЭВМ для накопления начальных, текущих и конечных значений по результатам одного «прогона» имитационной модели.

5. Начало прогона. Наращивание на Δ абсолютного удлинения образца.

6. Расчет изменений характеристик каждого из волокон и характеристик структуры как следствий удлинения. Определение «судьбы» для каждого волокна: а) удлинение волокна – при сильном взаимодействии волокна с соседними волокнами, когда силы сцепления и трения превосходят силы деформации; б) разрыв волокна – если его разрывная нагрузка меньше действующих на него сил; в) скольжение волокна относительно соседних волокон – если силы, действующие на волокно, превосходят максимальную силу трения и сцепления, но меньше разрывной нагрузки этого волокна.

7. Пересчет «текущих» значений характеристик волокон: удлинения, смещения, напряжения от удлинения, радиуса и угла кручения, – для текущего удлинения образца. Уменьшение числа волокон в сечениях из-за разрыва и скольжения волокон. Сохранение характеристик текущего состояния волокон в контейнерах.

8. Повторение цикла: пп. 5–7, пока в одном из сечений остается хотя бы одно волокно, т. е. пока не наступает полный разрыв образца.

9. По накопленным в контейнерах данным обработка результатов каждого прогона модели.

10. Повторение прогонов (пп. 3–9) для накопления результатов и интегральная обработка результатов нескольких прогонов для получения статистически устойчивых выводов для моделируемого варианта пряжи.

В модели один прогон имитирует испытание в реальном опыте одного образца пряжи. Повторные прогоны имитируют повторные опыты для одной и той же пряжи.

На рисунке 1, а показаны диаграммы динамики изменения силы сопротивления удлинению образца P и составляющие этой силы, связанные с растягивающимися волокнами P_e , скользящими волокнами P_s , волокнами, выходящими из области разрыва и разрывающимися волокнами P_b . На рисунке 1, б показаны диаграммы, отображающие динамику изменения общего числа волокон K_o в этой области и количества растягивающихся K_e , скользящих K_s , оборвавшихся волокон K_b и волокон, вышедших из рассматриваемой области и не участвующих в сопротивлении этого участка пряжи удлинению, K_u .

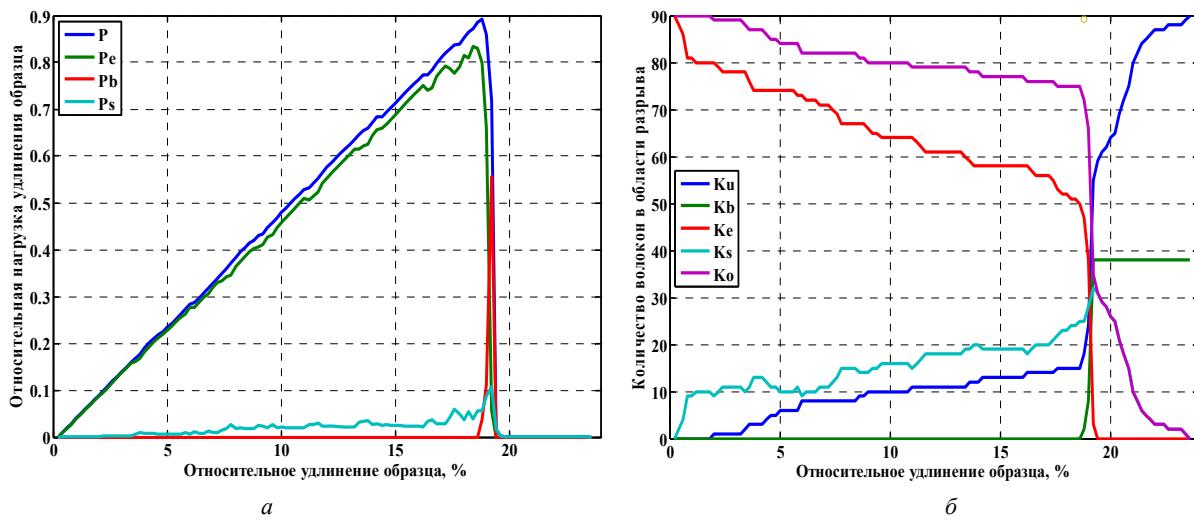


Рис. 1. Динамика сопротивления пряжи удлинению

Перечисленные характеристики показаны как функции нарастающего с постоянной скоростью относительного удлинения ε , % моделируемого образца пряжи.

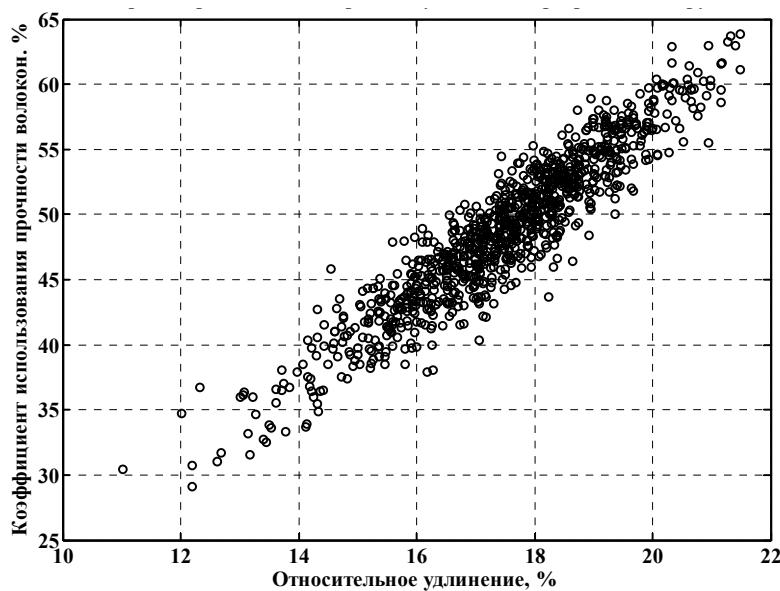
Приведенные кривые получены как результат одного прогона модели. Заданные значения параметров модели соответствовали пряже 15,4 текс с коэффициентом крутки $\alpha = 34$, произведенной из вискозных волокон с параметрами, близкими к средневолокнистому хлопку, при условии, что коэффициенты вариации всех характеристик волокон близки к нулю (вариант М1 модели).

Наблюдаемые на графиках случайные вариации составляющих силы сопротивления и числа волокон перечисленных выше категорий в процессе удлинения образца вызваны случайными вариациями положения отдельных волокон вдоль оси и в поперечных сечениях образца. Заметим, что из всех приведенных кривых в реальном эксперименте возможно получение только кривой $P(\varepsilon)$ на рисунке 1, а. Очевидно, что компьютерная имитация дает несравненно больше информации о динамике удлинения и разрыва образца, чем реальный опыт.

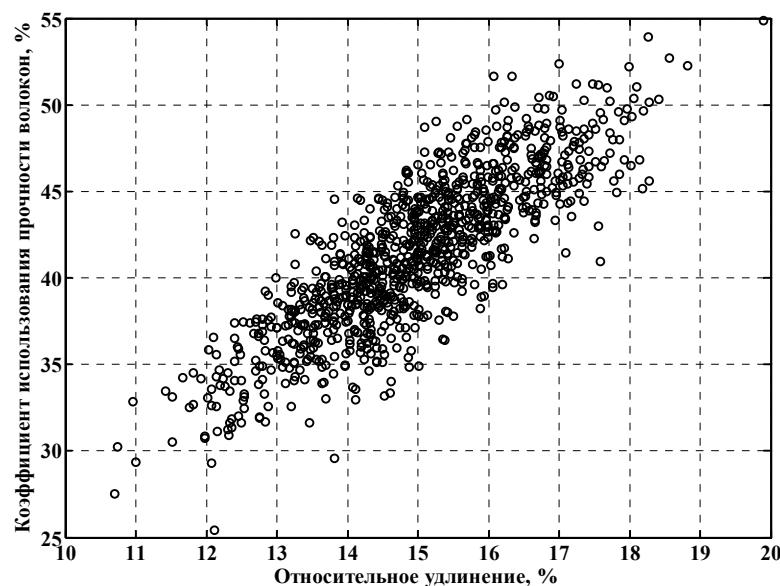
Повторные прогоны модели при неизменных параметрах дают по указанным выше причинам статистический разброс результатов. На рисунке 2 показана диаграмма рассеяния величин «относительное разрывное удлинение образца – коэффициент использования прочности волокон», полученная по результатам 500 повторных прогонов. Рассеяние вызвано только статистическим разбросом значений характеристик структуры пряжи: кручения отдельных волокон, их расположения вдоль оси и в поперечных сечениях образца. Видно, что даже при совпадающих значениях характеристик у всех

волокон (коэффициенты вариации заданы равными нулю, что соответствует волокнам искусственного происхождения) наблюдается заметное рассеяние результатов по разным образцам вследствие статистического разброса в строении и структуре пряжи.

Аналогичная диаграмма при статистическом разбросе значений характеристик волокон (коэффициент вариации для длины, площади поперечных сечений, разрывного удлинения и разрывной нагрузки, был задан равным 20%) приведена на рисунке 3 (вариант модели М2).



**Рис. 2. Зависимость рассеяния «относительное удлинение – коэффициент использования прочности волокон».
Все волокна одинаковы по всем характеристикам**



**Рис. 3. Зависимость рассеяния «относительное удлинение – коэффициент использования прочности волокон».
Все волокна имеют случайный разброс по всем характеристикам**

Сравнение диаграмм (рис. 2 и 3) показывает снижение в среднем примерно на 8...10% коэффициента использования прочности волокон и заметное, примерно на 20%, возрастание разброса результатов по повторным прогонам. Повторные испытания реальных образцов нескольких видов пряжи в исследовании Н. Н. Труевцева [14] дали аналогичные значения и служат косвенным подтверждением результатов моделирования.

Отмеченный разброс разрывного удлинения и разрывной нагрузки, выраженной в коэффициенте использования прочности волокон, заметно меняет вид кривых на рисунке 1, а, б. Например, на рисунке 4 показаны результаты моделирования четырех образцов пряжи для варианта М2. Разрыв каждого образца происходит не единомоментно, а занимает целую область удлинений (на рисунке область выделена овалом). Аналогичная картина наблюдается и для других характеристик динамики удлинения, отображенных на рисунке 1.

Наиболее наглядным способом сравнения вариантов моделирования является визуальная

оценка по графикам кривых. Однако для обеспечения статистической устойчивости результатов необходимо выполнить сотни повторных прогонов каждого варианта. Для ускорения и автоматизации обработки результатов предлагается после каждого прогона для каждой кривой на рисунке 1 построить ее аппроксимацию – регрессию зависимости. Например, для зависимости $P(\varepsilon)$ была использована регрессия

$$P(\varepsilon) = \frac{a(1 - \exp(-be^c))}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{d}\right)^r}, \quad (1)$$

где P – сила сопротивления образца удлинению, отнесенная к суммарной величине средней разрывной нагрузки волокон в сечении; a, b, c, d, r – параметры аппроксимации.

Очевидно, что аппроксимация (1) является нелинейной по параметрам однофакторной регрессии, параметры которой оцениваются, например, нелинейным методом наименьших квадратов с применением средств cftool в программной системе Matlab.

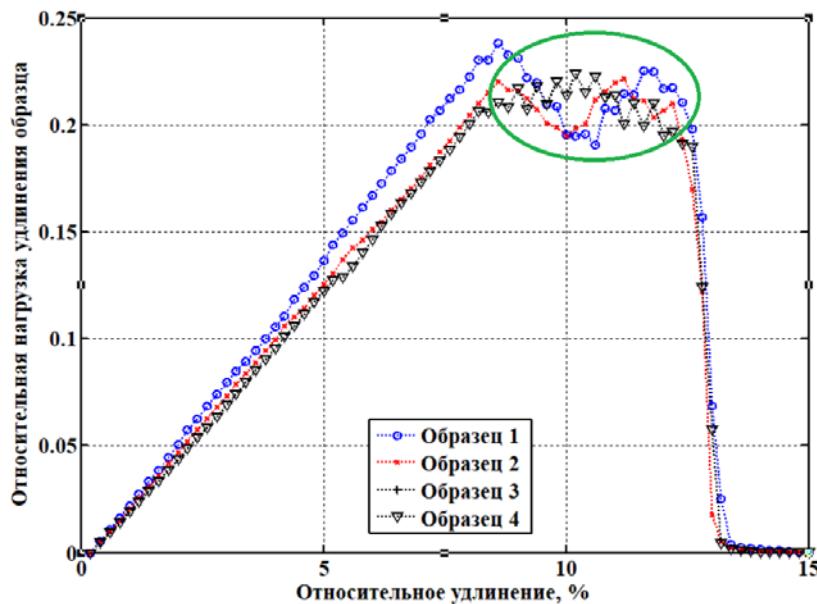


Рис. 4. Результаты моделирования четырех образцов пряжи для варианта М2

На рисунке 5 показаны примеры такой аппроксимации для 5 повторных прогонов модели. Изменяя значения параметров в (1), удается надежно и с малой ошибкой описать наблюдаемые зависимости. В таблице показан пример применения параметризации зависимости аппроксимирующей регрессией (1) для 500 повторных прогонов модели. В ней содержатся медианные оценки и их среднеквадратические отклонения (СКО) для каждого из 5 параметров

(1), а также для значений среднего квадрата остаточной ошибки аппроксимации SSE и квадрата коэффициента детерминации R^2 для двух вариантов пряжи (модели М1 и М2).

Разработанная методика: компьютерная имитационная модель динамики удлинения и разрыва образца пряжи; обработка результатов с применением аппроксимации зависимостей нелинейными регрессиями; получение оценок параметров регрессии с показателями их

точности – позволяют осуществить эксперименты по оценке влияния различных факторов, включенных в модель, на особенности динами-

ки удлинения и разрыва пряжи при различных вариантах характеристик волокон, строения и структуры пряжи.

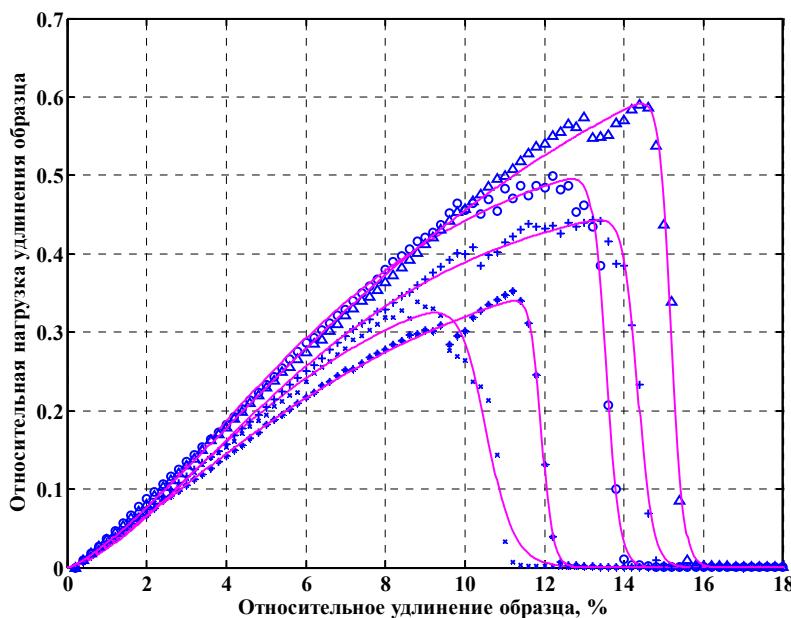


Рис. 5. Результаты аппроксимации 5 повторных прогонов модели при неизменных условиях моделирования и случайных вариациях характеристик волокон и структуры пряжи

Т а б л и ц а

Оценки параметров аппроксимации по прогонам модели

Оценка по прогонам	Коэффициент аппроксимации					SSE	R^2
	a	b	c	d	r		
Медиана (M1)	1,242	0,0263	1,19	18,31	336,3	0,0067	0,999
Медиана (M2)	0,605	0,047	1,41	13,57	80,09	0,0164	0,993
СКО, % (M1)	62,60	28,37	7,74	7,76	29,8	243,5	0,226
СКО, % (M2)	17,07	1,59	11,71	175,4	293,4	1,495	0,320

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ ISO 2062–2014. Материалы текстильные. Пряжа в пакетах. Методы определения разрывной нагрузки и относительного удлинения при разрыве одиночной нити с использованием прибора для испытаний с постоянной скоростью растяжения образца (CRE). М. : Стандартинформ, 2015. 12 с.
- Брашлер Е. Крепость хлопчатобумажной пряжи : пер. с нем. / под ред. проф. В. В. Линде и инж. В. И. Будникова. М. : Гизлэгпром, 1939. 152 с.
- Трыков П. П. Кручение текстильных материалов и зависимость между свойствами волокна и крепостью пряжи : дис. ... канд. техн. наук. М., 1940. 260 с.
- Соловьев А. Н. Свойства пряжи и зависимость их от крутики и свойств хлопка. М., 1941. 18 с.
- Основы прядения : в 2 т. / В. И. Будников, И. В. Будников, В. Е. Зотиков [и др.] ; под ред. проф. В. Е. Зотикова. М.-Л. : Гизлэгпром, 1944–1945.
- Севостьянов А. Г. Сборник задач по теории процессов прядения / под ред. проф. В. Е. Зотикова. М.-Л. : Гизлэгпром, 1948. 232 с.
- Бархоткин Ю. К. Развитие теоретических основ и технологии получения пряжи на кольцевой прядильной машине : дис. ... д-ра техн. наук. Иваново, 2005. 301 с.
- Севостьянов П. А. Статистическая имитация растяжения и разрыва пряжи // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 1981. № 3. С. 9–13.
- Севостьянов П. А. Прогнозирование характеристик и повышение эффективности исследований технологических систем прядильного производства : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1985. 49 с.
- Севостьянов П. А. Компьютерное моделирование технологических систем и продуктов прядения. М. : Информ-Знание, 2006. 447 с.

11. Севостьянов П. А., Яковлева Ю. С. Исследование влияния вида распределения характеристик волокон на прочностные свойства пряжи // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2009. № 4(318). С. 105–106.
12. Sevostyanov P. A. Computer modeling of strand elongation // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2009. № 3С. С. 95–97.
13. Sevost'yanov P. A., Samoilova T. A., Monakhov V. V., Ordov K. V. Dynamics of Elongation and Breaking of Complex Yarnsand Its Dependenceon Filament Properties in Modeling Semicyclic Deformations // Fibre Chemistry. 2017. Vol. 49, no 2. P. 142–144.
14. Труевцев Н. Н. Комплексная оценка свойств и расширение области применения пряжи пневмомеханического способа прядения : дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1983. 345 с.

REFERENCES

1. GOST ISO 2062–2014. Materialy tekstil'nye. Pryazha v pakovkax. Metody opredeleniya razryvnoj nagnuzki i otnositel'nogo udlineniya pri razryve odinochnoj niti s ispol'zovaniem pribora dlya ispytanij s postoyannoj skorostyu rastyazheniya obrazca (CRE). [Textile materials. Yarn in packages. Methods for determination of breaking load and relative elongation at break of a single yarn using a constant rate of extension (CRE) tester]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 12 p. (In Russ.)
2. Brashler E. Strength of cotton yarn: Translated from German. Moscow, Gizlegprom Publ., 1939. 152 p. (In Russ.)
3. Trykov P. P. Twisting of textile materials and the relationship between fiber properties and yarn strength. Cand. techn. sci. dis. Moscow, 1940. 260 p. (In Russ.)
4. Soloviev A. N. Properties of yarn and their dependence on twist and properties of cotton. Moscow, 1941. 18 p. (In Russ.)
5. Budnikov V. I., Budnikov I. V. Fundamentals of spinning. Moscow, Gizlegprom Publ., 1944–1945. 2 vol. (In Russ.)
6. Sevostyanov A. G., ed. Zotikov V. E. Collection of problems on the theory of spinning processes. Moscow, Gizlegprom publ., 1948. 232 p. (In Russ.)
7. Barkhotkin Yu. K. Development of theoretical foundations and technology of yarn production on a ring spinning machine. Doct. techn. sci. dis. Ivanovo, 2005. 301 p. (In Russ.)
8. Sevostyanov P. A. Statistical simulation of yarn stretching and breaking. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 1981;3:9–13. (In Russ.)
9. Sevostyanov P. A. Forecasting characteristics and increasing the efficiency of research into technological systems of spinning production. Abstract of Doct. techn. sci. dis. Moscow, 1985. 49 p. (In Russ.)
10. Sevostyanov P. A. Computer modeling of technological systems and spinning products. Moscow, Inform-Znanie Publ., 2006. 447 p. (In Russ.)
11. Sevostyanov P. A., Yakovleva Yu. S. Study of the influence of the type of distribution of fiber characteristics on the strength properties of yarn. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2009;4(318):105–106. (In Russ.)
12. Sevostyanov P. A. Computer modeling of strand elongation. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2009;3C:95–97. (In Russ.)
13. Sevost'yanov P. A., Samoilova T. A., Monakhov V. V., Ordov K. V. Dynamics of Elongation and Breaking of Complex Yarnsand Its Dependenceon Filament Propertiesin Modeling Semicyclic Deformations. Fibre Chemistry. 2017;49(2):142–144.
14. Truevtsev N. N. Comprehensive assessment of the properties and expansion of the scope of application of yarn of the rotor-mechanical spinning method. Doct. techn. sci. dis. Leningrad, 1983. 345 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 10.09.2025
Принята к публикации 07.11.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

П. А. Севостьянов, доктор технических наук, профессор
Т. А. Самойлова, кандидат технических наук, доцент
Н. В. Минаева, старший преподаватель