УДК 677.022.3/.5
DOI 10.47367/0021-3497_2025_5_206

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ВОЛОКОН И ПОЛЕЙ СИЛ ТРЕНИЯ В ВЫТЯЖНЫХ ПРИБОРАХ ПРЯДИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

ANALYSIS OF FIBER MOTION AND FRICTION FORCE FIELDS IN SPINNING DRAWING SYSTEMS

Н.Е. ФЕДОРОВА, К.Э. РАЗУМЕЕВ, А.В. МЕДВЕДЕВ

N.E. FEDOROVA, K.E. RAZUMEEV, A.V. MEDVEDEV

(Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(The Kosygin State University of Russia)

E-mail: fedorova-ne@rguk.ru

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения равномерности пряжи, неровнота полуфабрикатов по толщине препятствует эффективному и экономически выгодному производству. Несовершенство технологических процессов, особенно на этапе вытягивания, является значимым фактором, определяющим неровноту. В связи с этим анализ движения волокон и полей сил трения в вытяжных приборах прядильного производства представляет собой важную задачу для оптимизации процесса. Напряжение поперечного сжатия волокнистого продукта в вытяжных приборах прядильного производства предопределяет неровноту через взаимосвязанные параметры процесса вытягивания: определенную функцию движения волокон и силы, действующие на волокна в вытяжном приборе. В исследовании использован метод определения идеальной функции движения волокон разной длины. Разработана специализированная программа, которая предназначена для автоматизированного проектирования технологического режима ленточной машины, позволяющая комбинировать варьируемые конструктивные и технологические параметры в вытяжном приборе, определять напряжение сжатия волокнистого продукта в зажиме выпускной пары.

The relevance of the study is due to the need to improve the uniformity of the yarn; unevenness of semi-finished products in thickness hinders efficient and cost-effective production. Imperfection of technological processes, especially at the drawing stage, is a significant factor determining unevenness. In this regard, the analysis

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания 1025022600174-0-2.5.6 «Разработка комплекса мероприятий и научное сопровождение производства полного цикла по переработке овечьей шерсти в Российской Федерации с интеграцией компетенций отечественной научно-образовательной школы технологии, дизайна и моды продукции из шерсти».

of fiber motion and friction force fields in the drawing devices of the spinning industry is an important task for process optimization. The transverse compression stress of the fibrous product in the drawing devices of the spinning industry determines the unevenness through the interrelated parameters of the drawing process: a certain function of fiber motion and the forces acting on the fibers in the drawing device. The study used a method for determining the ideal function of the motion of fibers of different lengths. A specialized program has been developed, which is intended for the automated design of the technological mode of a tape machine, allowing for the combination of variable design and technological parameters in the drawing device, and determining the compression stress of the fibrous product in the clamp of the discharge pair.

Ключевые слова: прядильное производство, волокнистый продукт, неровнота, движение волокон, анализ сил, система игл, напряжение сжатия.

Keywords: spinning, fiber product, unevenness, fiber movement, force analysis, needle system, compressive stress.

Введение

Неровнота лент по толщине препятствует выработке пряжи экономически обоснованными методами. Неровнота является следствием множества причин на каждом из технологических переходов прядильного производства, одной из которых является несовершенство процессов технологии. Приведенный фактор имеет определяющее значение в технологическом процессе вытягивания и при формировании продукта из отдельных порций на гребнечесальной машине [1, 2]. Поэтому анализ движения волокон и полей сил трения в вытяжных приборах прядильного производства является актуальной задачей исследования.

В гребенной системе прядения процесс вытягивания осуществляется многократно в вытяжных приборах на ленточных, ровничных и прядильных машинах. Важное значение в технологии прядения имеют методы оперативного расчета сил, действующих на волокна в зонах обработки на оборудовании.

Методы

В исследовании использован известный метод определения идеальной функции движения шерстяного волокна, который описан в работах [1, 3, 4].

Неровнота от вытягивания является следствием определенной функции движения волокон в вытяжном приборе. Под функцией движения волокон понимается функция S(l) – зависимость расстояния между диаметральной плоскостью валика и цилиндра а-а (рис. 1: 1 – валик, 2 – цилиндр, а-а – диаметральная плоскость валика и цилиндра) и передним кончиком волокна в момент изменения его скорости от длины волокна [3, 4].

Волокна разной длины переходят со скорости питающей пары на скорость выпускной пары по достижении передними кончиками волокон различных сечений поля вытягивания. Даже для волокон одной длины из-за нестабильности сил трения, действующих на них, положение их сечения относительно диаметральной плоскости валика и цилиндра непостоянно.

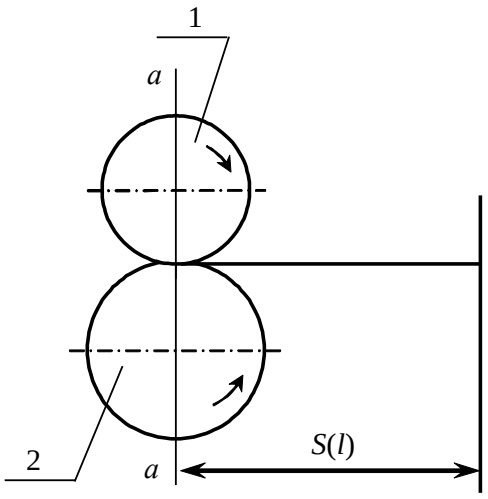

Рис. 1

Функция движения волокна обусловлена исключительно соотношением сдерживающих и ускоряющих сил, действующих на волокно в определенном месте вытяжного прибора [5].

Распределение сил трения вдоль поля вытягивания неравномерно, так как они генерируются рабочими органами разной геометрической формы и поверхности рабочих органов обладают разными свойствами. Волокна в поле вытягивания образуют полуфабрикат – мычку. Рабочие органы сжимают волокнистую мычку неравномерно, при этом в разных сечениях поля вытягивания число волокон, имеющих разные скорости, непостоянно [6…8].

В эластичном зажиме выпускной пары ускоряющая сила определяется по обобщенной формуле:

$$F_{y1} = \sum_{K=1}^{K=4} \int_{y_1}^{y_2} m_K(y)\, a_{KD} \left[\frac{\sigma_j(y)}{m_k(y)}\right] P_1(y) \ldots P_q(y) dy, \quad (1)$$

где y_1, y_2 – границы зоны действия эластичного зажима; $m_K\ (y)$ − число контактов между волокнами на единицу длины волокна; $\sigma_j(y)$ − напряжение сжатия, приходящееся на единицу длины одного волокна; a_{KD} − эмпирический коэффициент, соответствующий динамическому и статическому трению для разных контрпар K; $P_1(y) \ldots P_q(y)$ − вероятностные характеристики параметров процесса.

Набор этих характеристик для каждого из компонентов формулы (1) различен [3…5], физический смысл характеристик следующий: $P_1(y)$ − вероятность того, что волокно принадлежит к периферийной области сечения мычки, прилегающей к валику; $P_2(y)$ − вероятность того, что волокно принадлежит к периферийной части мычки, прилегающей к цилиндру; $P_3(y)$ − вероятность того, что волокно, расположенное в периферийной области мычки, прилегающей к валику, контактирует с его поверхностью;$P_4(y)$ − вероятность того, что волокно, расположенное в периферийной области мычки, прилегающей к цилиндру, контактирует с его поверхностью; $P_5(y)$ − вероятность того, что волокно расположено в центральной области; $P_6(y)$ − вероятность того, что волокно контактирует с быстро движущимися волокнами; $P_7(y)$ − вероятность того, что волокно, расположенное в периферийной области мычки, прилегающей к валику, контактирует с волокнами; $P_8(y)$ − вероятность того, что волокно, расположенное в области мычки, прилегающей к цилиндру, контактирует с волокнами.

Применимость вероятностных характеристик процесса при расчете ускоряющих сил, действующих на волокно в эластичном зажиме, впервые представлена в работе [4].

Для сдерживающих сил расчет следует вести по формуле, содержащей два слагаемых, аналогичных слагаемым формулы (1), но со следующими изменениями: вместо эмпирических коэффициентов, характеризующих динамическое трение, необходимо использовать коэффициенты, характеризующие статическое трение в контактах волокно – волокно и волокно – рабочий орган; вероятностные характеристики процесса приведены в работах [3, 4].

Результаты и обсуждения

Формула (1) универсальна и может использоваться для расчета как действующих на волокно ускоряющих, так и сдерживающих сил. Она содержит два слагаемых, одно из которых учитывает силы трения между волокнами в центральной области, а другое – в периферийной. В соответствии с этим необходимо учитывать вероятность принадлежности волокна к центральной или периферийной области, вероятность контактирования волокна с быстро или медленно движущимися волокнами, а также эмпирические коэффициенты, характеризующие статическое или динамическое трение.

В гребенном поле действуют две группы сил: ускоряющие, обусловленные

трением медленно движущегося рассматриваемого волокна о быстро движущиеся волокна; сдерживающие, возникающие вследствие трения его о медленно движущиеся волокна и об иглы.

Определим силу начального натяжения волокна около иглы, ближайшей к его наиболее удаленному от выпускной пары вытяжного прибора кончику. На участок волокна от этого кончика до этой иглы могут воздействовать как быстро, так и медленно движущиеся волокна, поэтому сила начального натяжения этого участка

$$F_{ab} = \int_{y_a}^{y_b} m_{\text{K}}(y)\, a_{\text{KS}} \left[\frac{\sigma(y)}{m_{\text{K}}(y)}\right]^{b_{KS}} P_5(y)\,dy - y \int_{y_a}^{y_b} m_{\text{K}}(y).\left[\frac{\sigma(y)}{m_{\text{K}}(y)}\right] P_6(y)\,dy, \qquad (2)$$

где y_a и y_b – координаты границ заднего участка волокна.

Сила, необходимая для смещения волокна вдоль иглы круглого сечения или скругленного участка плоской иглы:

$$F_{bc2} = F_{ab} e^{\mu J_1} + \left\{\left[\frac{B}{2}\left(R + \frac{d}{2}\right)^2 - \sigma v\right]\left(e^{\mu\delta} - 1\right) + \mu\sigma_N\right\} e^{\mu J_1} \sum \frac{1}{e^{j\mu\delta}}; \qquad (3)$$

где μ – коэффициент трения волокна об иглу; J_1 – угол охвата иглы волокном; B – жесткость волокна при изгибе; R – радиус иглы; d – диаметр волокна; σ – масса единицы длины волокна; v – скорость волокна относительно иглы; δ – каждый из элементарных углов, на которые разбивается угол охвата; j – условный номер элементарного угла δ; σ_N – напряжение поперечного сжатия волокна в межигольном пространстве.

Подробный анализ сил, действующих на волокна в системе игл, описан в работах [3, 4, 8…12]. В приведенных работах описаны формулы для определения сил, действующих на волокна на линейных участках сечения плоской иглы. Сила начального натяжения волокна, огибающего один скругленный участок первой плоской иглы гребенного поля, для второй иглы равна

$$T_{02} = F_{\text{bc1}} + F_{\text{bc2}} + F_{\text{bc3}} + F_{1-2}. \qquad (4)$$

При этом для разных участков волокна, взаимодействующего со второй иглой, применимы формулы, рассмотренные выше для случая взаимодействия с первой иглой. Скорость волокна, находящегося в гребенном поле в тех положениях, при которых сумма определяемых по формуле (4) сил больше нуля, равна скорости гребенного поля. При невыполнении этого условия волокно приобретет скорость выпускной пары. В общем виде с учетом сил, действующих на волокно во всех зонах вытяжного прибора, условие перехода волокна на скорость выпускной пары таково:

$$F_{\text{y1}} + F_{\text{y2}} = T_1 + F_{\text{S1}} + T_{\text{S2}}, \qquad (5)$$

где T_1 – сила, необходимая для извлечения волокна из гребенного поля.

В приведенные аналитические зависимости входят следующие параметры: напряжение сжатия, число контактов волокон друг с другом и с поверхностями рабочих органов, эмпирические коэффициенты, характеризующие фрикционные взаимодействия контрпар, вероятностные характеристики процесса, углы охвата игл волокном, углы геодезического отклонения [6]. Эти параметры необходимо определить для расчета сил, действующих на волокна в поле вытягивания.

Количество волокнистого материала, поступающего в вытяжной прибор (загрузка питания), увеличивает или уменьшает силы трения. В пространство между иглами помещается соответственно большее или меньшее количество волокнистого материала. Загрузку на питании оценивают суммарной линейной плотностью лент.

Как видно из приведенных аналитических зависимостей для определения сил, действующих на волокна в вытяжном приборе, необходимо знать распределение напряжения сжатия продукта, чисел контактов, углы огибания волокном игл гребенного поля, вероятностные характеристики процесса.

Напряжение поперечного сжатия волокнистого продукта предопределяет неровноту через взаимосвязанные параметры процесса вытягивания. Взаимосвязь параметров процесса вытягивания в вытяжных приборах прядильного производства представлена на рис. 2.

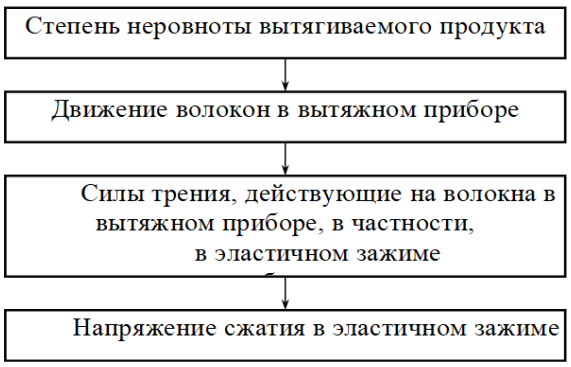

Рис. 2

Взаимодействующие между собой эластичный валик и цилиндр, которые соприкасаются по образующей и прижаты друг к другу нагрузкой, – это типичный механизм вытяжного прибора машин прядильного производства. Результаты обработки волокнистого продукта, который находится между валиком с эластичным покрытием и металлическим цилиндром в сжатом состоянии, существенно зависят от распределения сжимающей нагрузки в зажиме. Нагрузка или напряжение наряду с напряжением промежуточного поля сил трения предопределяет силы, действующие на волокна и их поведение (движение волокон) в вытяжных приборах, а следовательно, и неровноту по толщине продукта после вытягивания, прочность и другие его показатели. Для улучшения его качественных показателей необходимо оперативно в производственных условиях подбирать соответствующие значения напряжения сжатия продукта в зависимости от параметров технологического процесса [3].

В рамках данного исследования разработана специализированная программа «Определение характеристики напряжения сжатия в зажиме вытяжного прибора ленточной двухпольной машины прядильного производства» [5].

Программа предназначена для автоматизированного проектирования технологического режима ленточной двухпольной машины, позволяет комбинировать варьируемые конструктивные и технологические параметры в вытяжном приборе ленточной машины прядильного производства в любом сочетании и определять напряжение сжатия волокнистого продукта в зажиме выпускной пары на разных расстояниях от диаметральной плоскости валика и цилиндра с визуализацией зависимостей.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана программа, которая позволяет определять напряжения сжатия в эластичном зажиме, благодаря этому становится возможным на этапе проектирования технологического режима воздействовать на степень неровноты вытягиваемого продукта, на прочность волокнистой ленты. Разработанная программа также позволяет подбирать соответствующие значения напряжения сжатия в зависимости от параметров технологического процесса для улучшения качественных показателей волокнистого продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Энхтуяа Д., Капитанов А.Ф.* Технология первичной обработки и прядения козьего пуха: монография. М.: Университет, 2011. 245 с. – ISBN 978-5-98227-821-0.

2. *Lakshmanan A.* (2022) Chapter 4 – Physical and chemical properties of wool fibers // In The Textile Institute Book Series, Wool Fiber Reinforced Polymer Composites, Woodhead Publishing, pp. 49…71. – ISBN 9780128240564. – https://doi.org/10.1016 /B978-0-12-824056-4.00011-X.

3. *Люсова Н.Е.* Разработка метода автоматизированного проектирования технологического режима приготовления гребенной ленты: дис. … канд. техн. наук. М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2003.

4. *Капитанов А.Ф.* Фрикционные процессы в прядении. Ч. 1: Прядение и трибология. М., 2005. 293 с.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023610041, 09.01.2023. Определение характеристики напряжения сжатия в зажиме вытяжного прибора ленточной двухпольной машины прядильного производства.

6. *Федорова Н.Е.* Применение цифрового моделирования для построения траектории движения волокна в системе игл // Актуальные направления развития текстильной и легкой промышленности в современных условиях. Ч. 2. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024. С. 20…24.

7. *Федорова Н.Е., Разумеев К.Э.* Силовые поля систем игл машин прядильного производства // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. Т. 64, № 6. С. 69…72. – DOI 10.46418/0021-3489_2023_64_06_14.

8. *Федорова Н.Е., Разумеев К.Э. Литвинов А.М., Вагнер В.И.* Вопросы оптимизации силовых полей активных рабочих зон машин прядильного производства // Химические волокна. 2021. №3. С. 66…68.

9. *Korabayev Sh.A., Tashpulatov S.Sh., Matismailov S.L. et al.* Experimental Study of Influence of Air Flow of Rotary Spinning Machine Confuser on Fiber Movement // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности 2024. № 6(414). С. 231…236. – DOI 10.47367/0021-3497_2024_6_231.

10. *Тожимирзаев С.Т., Парпиев Д.Х., Омонов М.* Исследование изменений свойств волокон по переходам в процессе прядения // Universum: технические науки. 2020. № 6-2(75). С. 50…56.

11. *Волков В.В., Пакулова Н.К.* Моделирование движения волокна в вытяжных приборах ленточных машин // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2022. Т. 57, №3. С. 42…45. – DOI 10.46418/0021-3489_2022_57_03_08.

12. *Makhkamova Sh., Valieva Z., Gafurov K.B.* Research of the influence of Improved drafting system design on ring yarn quality // Education and science in the 21st century: Articles of the V International Scientificand Practical Conference. Витебск: ВГТУ, 2020. С.39…42.

R E F E R E N C E S

1. *Enkhtuya D., Kapitanov A.F.* Technology of primary processing and spinning of goat down: monograph. Moscow: Universitet, 2011. 245 p. – ISBN 978-5-98227-821-0.

2. *Lakshmanan A.* (2022) Chapter 4 – Physical and chemical properties of wool fibers // In The Textile Institute Book Series, Wool Fiber Reinforced Polymer Composites, Woodhead Publishing, pp. 49...71. – ISBN 9780128240564. – https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824056-4.00011-X .

3. *Lyusova N.E.* Development of a method for computer-aided design of the technological mode of preparation of a comb belt: dis... Candidate of Sciences. Tech. M.: Kosygin Moscow State Technical University, 2003.

4. *Kapitanov A.F.* Friction processes in spinning. Part 1: Spinning and tribology. Moscow, 2005. 293 p.

5. Certificate of state registration of the computer program No. 2023610041, 09.01.2023. Determination of the characteristics of the compression voltage in the clamp of the exhaust device of a ribbon two-field spinning machine.

6. *Fedorova N.E.* Application of digital modeling to plot the trajectory of fiber movement in the needle system // Current trends in the development of textile and light industry in modern conditions. Part 2. Moscow: Kosygin Russian State University of Economics, 2024. pp. 20…24.

7. *Fedorova N.E., Yaslyaev K.E.* Force fields of needle systems of spinning machines // Technology of Light Industry. The News of higher educational institutions. 2023. Vol. 64, No. 6. pp. 69...72. – DOI 10.46418/0021-3489_2023_64_06_14.

8. *Fedorova N.E., Yaslyaev K.E., Litvinov A.M., Wagner V.I.* Issues of optimization of force fields of active working zones of spinning machines // Chemical fibers. 2021. No. 3. pp. 66...68.

9. *Korabaev Sh.A., Tashpulatov S.Sh., Matismailov S.L. et al.* Experimental Study of Influence of Air Flow of Rotary Spinning Machine Confuser on Fiber Movement // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2024. No. 6(414). pp. 231...236. – DOI 10.47367/0021-3497_2024_6_231.

10. *Tozhimirzaev S.T., Parpiev D.H., Omonov M.* Investigation of changes in fiber properties by transitions during spinning // Universum: technical sciences. 2020. № 6-2(75). Pp. 50…56.

11. *Volkov V.V., Pakulova N.K.* Modeling of fiber motion in exhaust devices of belt machines // Technology of Light Industry. The News of higher educational institutions. 2022. Vol. 57, No. 3. pp. 42...45. – DOI 10.46418/0021-3489_2022_57_03_08.

12. *Makhkamova Sh., Valieva Z., Gafurov K.In* Research of the influence of Improved drafting system design on ring yarn quality // Education and science in the 21st century: Articles of the V International Scientific and Practical Conference. Vitebsk: Vitebsk State Technological University, 2020, pp. 39...42.

Рекомендована кафедрой проектирования и художественного оформления текстильных изделий РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 09.07.25.