УДК 531.43
DOI 10.47367/0021-3497_2026_3_142

ВЛИЯНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ХЛОПКОВОЙ ПРЯЖИ НА ЕЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА*

EFFECT OF MOISTURE CONTENT OF COTTON YARN ON ITS TRIBOTECHNICAL PROPERTIES

А.В. БАРАНОВ[1], О.В. БЛИНОВ[2], В.Б. КУЗНЕЦОВ[1], Е.Н. КАЛИНИН[1], А.Г. ЖЕЛЕЗНОВ[3]

A.V. BARANOV[1], O.V. BLINOV[2], V.B. KUZNETSOV[1], E.N. KALININ[1], A.G. ZHELEZNOV[3]

**([1]Ивановский государственный политехнический университет,
[2]Ивановский государственный энергетический университет,
[3]Ивановский государственный университет)**

**([1]Ivanovo State Polytechnic University,
[2]Ivanovo State Power Engineering University,
[3]Ivanovo State University)**

E-mail: enkalini@gmail.com

В работе исследовано влияние влагосодержания хлопковой пряжи на ее триботехнические свойства. Методом вынужденных резонансных колебаний определены динамические свойства хлопковой пряжи, характеризуемые изменением амплитудно-частотной характеристики. Изменение изгибных колебаний пряжи обусловлено "внешним" трением между элементарными волокнами и "внутренним" трением в волокнах. Прослежена связь коэффициента механических потерь и триботехнических характеристик хлопковой пряжи.

The paper studies the effect of moisture content on the tribological properties of cotton yarn. The method of forced resonance vibrations is used to determine the dynamic properties of cotton yarn, characterized by a change in the amplitude-frequency characteristic. The change in the bending vibrations of the yarn is due to the "external" friction between the elementary fibers and the "internal friction" within the fibers. The relationship between the mechanical loss coefficient and the tribological characteristics of cotton yarn is examined.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 20-43-370007 р_а_ Ивановская область: "Развитие научных основ прогнозирования функциональных и конструкционных параметров, синтезируемых полимерных волокнистых композитных систем".

Ключевые слова: хлопчатобумажная пряжа, макро-, мезо-, микроуровни, метод вынужденных резонансных колебаний, амплитудно-частотная характеристика, коэффициент механических потерь, трибологические характеристики пряжи.

Keywords: cotton yarn, macro-, meso-, microlevels, forced resonant oscillation method, amplitude-frequency characteristic, mechanical loss coefficient, tribological characteristics of yarn.

Тканый текстильный материал представляет собой сложную пространственную структуру, образованную основными и уточными нитями, отличающуюся многообразием переплетений, простейшим из которых является полотняное, где вышеуказанные нити пересекаются под прямым углом [1, 3].

В то же время, если рассматривать текстильный материал с точки зрения его триботехнических свойств, то его можно представить в виде многоуровневой структуры, а именно: макроуровень – собственно ткань, мезоуровень – основные и уточные нити, ее составляющие, и микроуровень – хлопковые волокна, образующие пряжу. На каждом из этих уровней возможно возникновение сил трения – между волокнами, нитями, а также поверхностью текстильного материала и транспортирующими устройствами текстильных машин и поточных линий, предназначенных для обработки тканей в отделочном производстве текстильных предприятий.

Ранее [3…6] был выполнен ряд экспериментов по определению коэффициента трения поверхности хлопчатобумажных тканей различного переплетения и влияния на его изменение различных физико-химических факторов. Вероятно, коэффициент трения поверхности ткани является неким комплексным показателем, включающим также и трение между нитями и волокнами. Но, безусловно, определяющим является трение поверхности текстильного материала о металлические поверхности транспортирующих элементов.

В настоящей работе сделана попытка исследовать на мезоуровне влияние влажности хлопчатобумажной пряжи на ее триботехнические свойства.

В условиях переработки и эксплуатации текстильные нити подвергаются, как правило, динамическому воздействию внешней механической силы. Существующие методы количественного описания деформационных свойств нитей в динамических режимах основываются на применении механических моделей, при создании которых используют параметры, полученные при статических испытаниях. Такой подход не соответствует результатам динамических испытаний.

Другим важнейшим фактором, который необходимо учитывать при разработке механических моделей, является содержание влаги в хлопке, поскольку вода является наиболее эффективным пластификатором целлюлозы среди растворителей различной природы [7].

Системе "целлюлоза-вода" посвящено большое количество исследований, однако сложность и многообразие протекающих в данной системе процессов порождают огромное количество нерешенных вопросов, что с учетом высокого практического потенциала целлюлозы делает актуальным изучение ее поведения в процессе увлажнения.

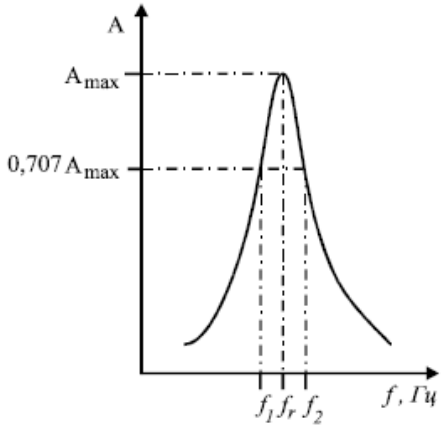
Вода приводит к перестройке надмолекулярной структуры целлюлозы, что сказывается на физико-механических характеристиках волокна. Данная работа посвящена изучению влияния влагосодержания на динамические механические свойства хлопковой пряжи.

Для определения динамических свойств хлопковой пряжи использован метод вынужденных резонансных изгибных колебаний [8, 9], который заключается в измерении на специальной установке амплитуды колебаний свободного конца пробы при из-

менении частоты прикладываемой силы и позволяет охватить частотный диапазон механических воздействий до 500 Гц. При исследовании динамических свойств материалов определяется резонансная частота f_r, которая соответствует максимальной амплитуде колеблющейся пробы. В проведенном исследовании длина зажатой в держателе части образца составляла 5 мм. С помощью звукового генератора плавно меняли частоту, обеспечивая сначала подъем, а затем спад амплитуды поперечных колебаний образца.

Измерение амплитуды колеблющейся пробы осуществляли оптическим микроскопом МПБ-2 с цифровой насадкой. Оптическое увеличение микроскопа 24 крат. Установка позволяет проводить измерения при различной влажности воздушной среды, которая задавалась насыщенными растворами солей в воде. Абсолютно сухая воздушная среда создавалась с помощью окиси фосфора. Измеряли амплитуды колеблющегося образца на частотах, меньших и больших *fr,* и по десяти значениям амплитуд и по соответствующим им частотам определяли амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) образца (рис. 1 – деформация изгиба образца пряжи при консольном закреплении (а) и амплитудно-частотная характеристика (б) [10]).

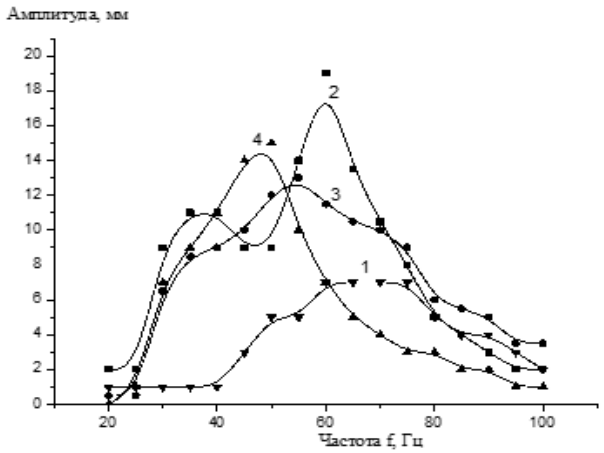
а)



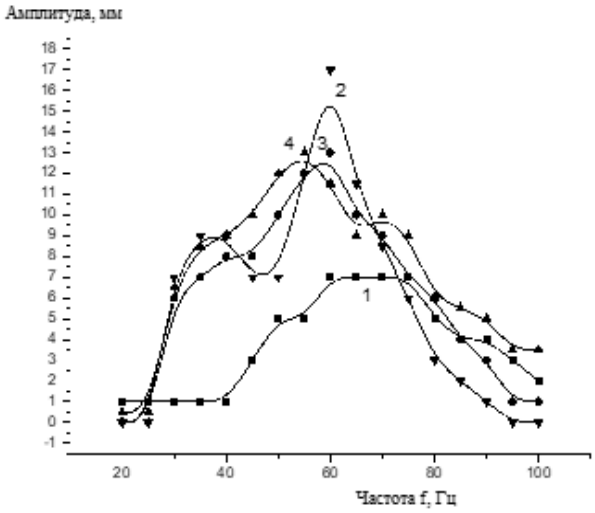
б)

Рис. 1

Полученные амплитудно-частотной характеристики образцов хлопковой пряжи представлены на рис. 2 (АЧХ – кривые хлопковой пряжи (а): 1 – выдержанная над P_2O_5; 2 – выдержанная при влажности 47%; 3 – выдержанная 48 часов при влажности 100%; 4 – выдержанная 480 часов при влажности 100%; (б): 1 – 0 %, 2 – 47 %; 3 – 55 %; 4 – 100 %).



а)



б)

Рис. 2

Обработку полученных АЧХ проводили с использованием коэффициента механических потерь в виде [10]:

$$\eta = \Delta f / f_r \ . \qquad (1)$$

Влияние влажности воздуха на коэффициент механических потерь пряжи показано в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	Образец пряжи	Коэффициент потерь η
1.	Выдержанный над P_2O_5	0,439
2.	Влажность 47 %, 48 часов	0.175
3.	Влажность 55 %, 48 часов	0,359
4.	Влажность 100 %, 48 часов	0,537
5.	Влажность 100 %, 480 часов	0,323

Как видно из приведенных в таблице данных, относительная влажность воздушной среды, а соответственно и влажность волокна существенным образом влияют на механические потери в пряже. Обращают на себя внимание высокие значения коэффициента потерь для абсолютно сухого волокна и волокна, выдержанного двое суток при 100% влажности воздуха. Следует отметить, что в данных случаях высокие значения потерь вызваны разными причинами.

Демпфирование изгибных колебаний пряжи обусловлено следующими факторами:

1) "внешним" трением между элементарными волокнами;

2) "внутренним" трением в волокнах.

"Внутреннее" трение в материалах имеет различную физическую природу. В кристаллических материалах оно обусловлено микропластическими деформациями по границам кристаллов и в объеме материала, в полимерах – преодолением сил молекулярного взаимодействия и т. д.

При динамическом нагружении пряжи возникают малые проскальзывания между волокнами по контактным поверхностям. Возникающие при этом силы совершают работу, определяющую потери энергии механических колебаний.

Особенность полимеров, резко выделяющая их из среды других материалов, – способность в зависимости от скорости приложения силы вести себя как жидкость или как твердое упругое тело либо же одновременно проявлять свойства того и другого. Можно выделить три зоны: высокоэластичного, стеклообразного состояния и переходную зону. Каждый аморфный полимер в зависимости от температуры и частоты колебаний может находиться в одном из этих состояний (или вязкотекучем). Максимальные демпфирующие свойства наблюдаются в переходной зоне [10]. Введение пластификатора снижает силы когезии между макромолекулами полимера, вследствие чего ослабляется межмолекулярное взаимодействие. Это эквивалентно уменьшению частоты или повышению температуры. Пластификацией можно добиться значительного смещения и расширения переходной зоны.

Так, для абсолютно сухого волокна высокое значение η связано с низким трением между волокнами в пряже, которое приводит к рассеиванию энергии механических колебаний.

При увлажнении пряжи происходит резкое снижение коэффициента механических потерь, связанное с увеличением коэффициента трения между волокнами. Однако наряду с изменением поверхностной энергии в волокне при увлажнении изменяется релаксационное состояние аморфных областей. Они переходят из стеклообразного состояния в переходную зону. Поэтому при дальнейшем увеличении влажности наблюдается постепенное увеличение показателя η.

При длительном воздействии воды на хлопковое волокно наряду с релаксационными происходят в нем также и структурные изменения. Прежде всего это касается степени кристалличности волокна. Детально процессы изменения кристаллической структуры хлопковых волокон при увлажнении рассмотрены в работах [11, 12], в которых на основании рентгеноструктурного анализа показано, что надмолекулярная структура хлопка в набухшем состоянии характеризуется максимальным содержанием кристаллической фазы и минимальным уровнем дефектности. Данные изменения соответствующим образом отражаются на коэффициенте механических потерь (см. образец №5).

ВЫВОДЫ

1. Методом вынужденных резонансных изгибных колебаний исследованы динамические свойства хлопчатобумажной пряжи.

2. Определена амплитудно-частотная характеристика для образца пряжи при различной влажности.

3. Установлена взаимосвязь между коэффициентом механических потерь и коэффициентом трения между волокнами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лунд-Иверсен Б.* Ткацкие переплетения: [пер. с норвеж.]. М.: Легпромбытиздат, 1987. 104 с.

2. *Грановский Т.С., Мшвениерадзе А.П.* Строение и анализ тканей. М.: Легпромбытиздат. 1988. 96 с.

3. *Блинов О.В., Кузнецов В.Б., Калинин Е.Н.* Влияние растворов поверхностно-активных веществ на трибологические свойства текстильных материалов в паре трения "ткань – транспортирующий ролик" // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. №2 (398). С. 233…237.

4. *Блинов О.В., Калинин Е.Н., Кузнецов В.Б. и др.* Результаты молекулярного моделирования триботехнических свойств неионогенных поверхностно-активных веществ // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. №5 (401). С. 190…194.

5. *Кузнецов В.Б., Блинов О.В., Баранов А.В., Калинин Е.Н.* Влияние поверхностного натяжения раствора неионогенного поверхностно-активного вещества на триботехнические свойства тканого наполнителя волокнистого композита // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2023. №3 (405). С. 168…173.

6. *Блинов О.В., Баранов А.В., Калинин Е.Н., Кузнецов В.Б.* Влияние физико-механических характеристик и архитектуры ткани на триботехнические характеристики ее поверхности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2023. №4(406). С. 157…163.

7. *Баранов А.В.* К вопросу о механизме пластификации целлюлозы жидкостями различной химической природы // Изв. вузов Химия и хим. технология. 2000. Т. 43, вып. 2. С. 147…149.

8. *Жихарев А.П.* Теоретические основы и экспериментальные методы исследования для оценки качества материалов при силовых, температурных и влажностных воздействиях: монография. М.: МГУДТ, 2003. 327 с.

9. *Лапшин В.В.* Разработка методологических основ и автоматизированного измерительного комплекса для оценки свойств текстильных материалов: дис. … д-ра техн. наук. Кострома, 2019.

10. *Талицкий Е.Н.* Механические воздействия и защита электронной аппаратуры: учеб. пособие. В 3 ч. Ч. 2. Владимир: ВлГУ, 2005. 124 с. – ISBN 5-89368-563-6.

11. *Якунин Н.А., Завадский А.Е, Морыганов А.П.* Изменение надмолекулярной структуры хлопковых волокон при сорбции паров воды // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2003. Т. 45, №5. С. 767…772.

12. *Якунин Н.А., Завадский А.Е.* Изменение структуры аморфной фазы хлопковой целлюлозы при взаимодействии с парами воды // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2004. Т. 46, № 6. С. 1023…1029.

REFERENCES

1. *Lund-Iversen B.* Weaving patterns. (Translated from Norwegian). Moscow: Legprombytizdat, 1987. 104 p.

2. *Granovsky T.S., Mshvenieradze A.P.* Structure and analysis of fabrics. Moscow: Legprombytizdat, 1988. 96 p.

3. *Blinov O.V., Kuznetsov V.B., Kalinin E.N.* The influence of surfactant solutions on tribotechnical properties of textile materials in the "fabric – conveying roller" friction pair // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 2 (398). Pp. 233…237.

4. *Blinov O.V., Kalinin E.N., Kuznetsov V.B. etc.* Results of molecular modeling of tribotechnical properties of nonionic surfactants // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 5 (401). Pp. 190…194.

5. *Blinov O.V., Baranov A.V., Kalinin E.N., Kuznetsov V.B.* Effect of the surface tension of a nonionic surfactant solution on the tribotechnical properties of a woven filler of a fibrous composite // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2023. №3(405). P. 168…173.

6. *Blinov O.V., Baranov A.V., Kalinin E.N., Kuznetsov V.B.* Influence of the physical and mechanical features and architecture of the fabric on the tribotechnical characteristics of its surface // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2023. №4 (406). P. 157…163.

7. *Baranov A.V.* On the mechanism of plasticization of cellulose with liquids of different chemical nature // News of universities Chemistry and chemical technology. 2000. V.43, issue 2. Pp. 147…149.

8. *Zhikharev A.P.* Theoretical foundations and experimental research methods for assessing the quality of materials under force, temperature and humidity influences: monograph. M.: MGUDT, 2003. 327 p.

9. *Lapshin V.V.* Development of methodological foundations and an automated measuring complex for assessing the properties of textile materials: dissertation of Doctor of Engineering Sciences. Kostroma, 2019.

10. *Talitsky E.N.* Mechanical effects and protection of electronic equipment: textbook. In 3 parts. Part 2. Vladimir: Vladimir. State University, 2005. 124 p. – ISBN 5-89368-563-6.

11. *Yakunin N.A., Zavadsky A.E., Moryganov A.P.* Changes in the supramolecular structure of cotton fibers during sorption of water vapor // High-molecular compounds. A. 2003. Vol. 45, No. 5. P. 767…772.

12. *Yakunin N.A., Zavadsky A.E.* Changes in the structure of the amorphous phase of cotton cellulose upon interaction with water vapor // High-molecular compounds. A. 2004. Vol. 46, No. 6. P. 1023…1029.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники ИВГПУ. Поступила 23.10.25.