

## ОСОБЕННОСТИ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ ДЕФОРМАЦИИ В ВАЛЯЛЬНО-ВОЙЛОЧНОМ МАТЕРИАЛЕ

### FEATURES OF DEFORMATION ENERGY DISSIPATION IN FELTING-FELT MATERIAL

И.Н. ЛЕДЕНЕВА, Е.А. КИРСАНОВА, П.А. СЕВОСТЬЯНОВ, В.С. БЕЛГОРОДСКИЙ

I.N. LEDENEVA, E.A. KIRSANOVA, P.A. SEVOSTYANOV, V.S. BELGORODSKY

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

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: ledeneva-in@rguk.ru; kirsanova-ea@rguk.ru; sevostyanov-pa@rguk.ru

*Рассмотрена проблема диссипации остаточной внутренней механической энергии в нетканом материале. Выдвинута гипотеза о наличии остаточной энергии механической деформации в волокнистом материале и изменении характеристик и формы нетканого валяльно-войлочного материала как результата диссипации этой энергии. Предложена нелинейная динамическая модель изменения деформационных характеристик материала во времени и, как следствие, получена качественная картина динамики диссипации остаточной механической энергии в нетканом волокнистом материале на примере обувного войлока.*

*The problem of dissipation of residual internal mechanical energy in a nonwoven material is considered on the example of shoe felt. A hypothesis was put forward about the presence of the mechanical deformation residual energy in the fibrous material and the change in the characteristics and shape of the nonwoven felting-felt material as a result of this energy dissipation. A non-linear dynamic model is proposed for the change in the deformation characteristics of a material over time and, as a result, a qualitative picture of the residual mechanical energy dissipation dynamics in a nonwoven fibrous material is obtained in shoe felt as an example.*

**Ключевые слова:** нетканый волокнистый материал, обувной войлок, упругая, эластическая, пластическая деформация, диссипация энергии, динамическая математическая модель.

**Keywords:** nonwoven fibrous material, shoe felt, elastic, plastic deformation, energy dissipation, dynamic mathematical model.

#### *Введение*

Известно, что способность обуви сохранять свою форму после снятия с колодки и в период эксплуатации в большей степени зависит не столько от свойств пакета материалов, сколько от свойств материала верха. Для решения задачи повышения формоустойчивости обуви с верхом из войлока существует несколько путей ре-

шения: совершенствование конструкции обуви и технологии ее изготовления, использование новых дублирующих материалов [1].

При производстве обуви и последующей ее эксплуатации материалы подвержены многократному действию внешней среды, вызывающей как обратимые, так и необратимые изменения исходных свойств. Со-

гласно теории наследственной вязкоупругости Больцмана-Вольтерра показатели свойств, характеризующих состояние объекта в данный момент времени, зависят от предыстории материала: состава и характеристик строения, которые определяются технологией их получения и рядом иных факторов. Поэтому при многократном действии внешней среды показатели вязкоупругих свойств изменяются по отношению к исходным и стремятся к новым равновесным значениям [2].

Использование математического аппарата в научных исследованиях позволяет рационально подойти к процессу прогнозирования свойств обуви с верхом из войлока, формируемых в процессе ее изготовления и эксплуатации. При решении многих практических задач сложность принимаемых решений зависит, прежде всего, от двух условий: количества альтернативных вариантов и большого количества разнородных критериев, на основании которых необходимо принимать решение. Принять "правильное решение" – значит выбрать такой вариант из числа рассматриваемых, который с учетом всех разнообразных и противоречивых требований будет в некотором смысле оптимальным [3].

Многие волокнистые материалы в процессе эксплуатации или хранения существенным образом изменяют свои характеристики, в частности, способность сопротивляться внешним механическим воздействиям [4...7]. Эта особенность напрямую отражается на внешнем виде изделий из таких материалов и продолжительности их использования. В отличие от металлических и полимерных материалов процессы изменения характеристик волокнистых материалов связаны не только с изменениями на атомарном, молекулярном или надмолекулярном уровне вещества, из которого изготовлены волокна, но в большой мере от изменения структуры волокнистого материала на уровне взаимодействия между отдельными волокнами разной пространственной формы (прямой, извитой, спирально и т.п.) и степенью контактов в зависимости от характера поверхности волокон [8], [9], [11]. Поскольку существует

много источников таких изменений, а сами изменения носят статистический характер, закономерности изменений характеристик волокнистых материалов обычно получают как эмпирические зависимости в виде регрессионных формул для частных случаев, факторов и задач.

Другой путь исследований заключается в построении модели динамики изменения характеристик материала на основе некоторых общих представлений о механизме поведения волокнистого материала под действием внешних и внутренних факторов [8...10], [12...18]. Такой подход позволяет получить модель с малым числом неизвестных параметров при качественно адекватном описании явления. В данной работе именно этот подход и использован для моделирования изменений в динамике поведения волокнистого материала с учетом предыстории его существования и прогноза напряженно-деформированного состояния валяльно-войлочных материалов в обуви.

#### *Методы*

Далее в качестве объекта рассмотрения выберем нетканый материал (НМ), например, войлок обувной ОСТ 17-531–75. Для структуры НМ характерны хаотическая форма и ориентация волокон [6], [7], [10], [19]. Волокна в НМ механически контактируют между собой, причем площадки контакта, их размер, ориентация в пространстве, количество по длине волокна и силы контакта случайны. При этом даже усредненные оценки этих параметров структуры НМ могут быть получены лишь с большим разбросом значений.

В первом приближении динамика деформации материала в процессе эксплуатации складывается из обратимой упругой и эластической деформации и необратимой пластической деформации. Динамическую модель (модель I) с одной степенью свободы, учитывающую эти составляющие, представим дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + a^2x(t) = f(t). \quad (1)$$

В этом уравнении  $x(t)$  описывает изменение некоторой характеристики, например, плотности НМ на единицу площади ( $\text{г/мм}^2$ ), в некоторой локальной области материала. Функция  $f(t)$  описывает напряжение, возникающее в НМ под действием внешней нагрузки. Составляющая  $a^2 \cdot x(t)$  равна силе сопротивления НМ, вызванной упругой деформацией. Слагаемое  $b \cdot dx(t)/dt$  равно силе сопротивления пластической составляющей деформации НМ. Эту составляющую обычно, для упрощения модели, считают пропорциональной скорости изменения  $x(t)$ . Для медленных деформаций, характерных при эксплуатации НМ, сделанные предположения и допущения можно считать приемлемыми.

Именно такие связи между изменениями характеристики материала и силами его сопротивления этим изменениям принимают как для обратимой упругой составляющей (в их основе – закон Гука), так и для необратимой пластической составляющей, связанной с силами внутреннего трения между элементами материала. Эти силы внутреннего трения приводят к диссипации внутренней энергии НМ и необратимости его деформации. Коэффициенты  $a$  и  $b$  отображают величину вклада каждой из составляющих в сопротивление материала внешним нагрузкам.

Знак у этих составляющих означает, что они действуют в сторону, противоположную внешнему механическому напряжению, и тем самым "работают" как сопротивление тем изменениям в материале, которые создает в нем внешняя нагрузка.

Для согласования элементов уравнения по размерности примем следующие размерности для параметров и переменных, входящих в уравнение (1):

$$[x] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}, \quad [f] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}, \quad [a] = \frac{1}{\text{с}}, \quad [b] = \frac{1}{\text{с}}.$$

Очевидно, что параметры  $a$  и  $b$  имеют размерность, обратную размерности времени. Коэффициент  $a$  определяет собственную частоту упругих колебаний, которые возникают в материале при отсутствии или малой величине диссипации

энергии. Коэффициент  $b$  пропорционален скорости диссипации энергии в материале в единицу времени.

#### Результаты и обсуждения

Решим уравнение (1) в численном виде с использованием процедуры `ode45` системы Matlab при начальных условиях  $x(t=0) = 1$  и  $dx(t=0)/dt = 0$  и постоянной величине напряжения  $f(t) = 1$ , которое "включается" в момент  $t = 0$ . Параметры  $a = 0,2 \text{ с}^{-1}$ ,  $b = 0,1 \text{ с}^{-1}$ .

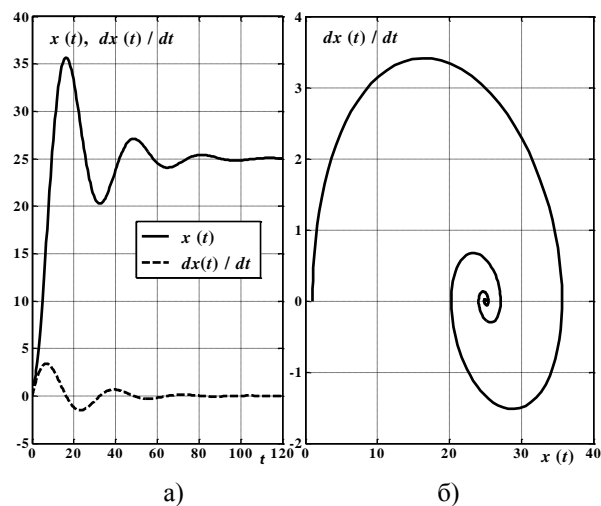


Рис. 1

Динамика изменения плотности (деформации)  $x(t)$  и скорости деформации  $dx(t)/dt$  во времени показаны на рис.1-а (рис. 1 – диссипация внутренней энергии НМ под действием постоянно действующей внешней нагрузки (модель I)). Видно, что сначала материал частично восстанавливает начальную форму, но со временем способность к восстановлению уменьшается, и материал переходит в некоторое остаточное деформированное состояние.

На рис.1-б показана диссипация внутренней энергии материала. Эта энергия на отрезке времени  $[t_1; t_2]$  пропорциональна площади сектора, "ометаемого" радиусом - вектором из начала координат между изображающими точками фазовой траектории за этот отрезок времени. Очевидно, что с течением времени эта энергия уменьшается. Легко показать, что эта энергия убывает по экспоненте  $\sim \exp(-2bt)$ , т.е. параметр  $b$  в уравнении (1) задает скорость диссипации энергии в материале.

Более реалистичную и близкую к наблюдаемым экспериментальным данным модель получим, если примем, что внешние нагрузки  $f(t)$  на НМ являются переменными во времени величинами. Чтобы наглядно представить влияние переменной нагрузки, периодичности и амплитуды ее воздействия, зададим функцию  $f(t)$  в виде последовательности импульсов (рис. 2 – модель периодического импульсного воздействия на НМ).

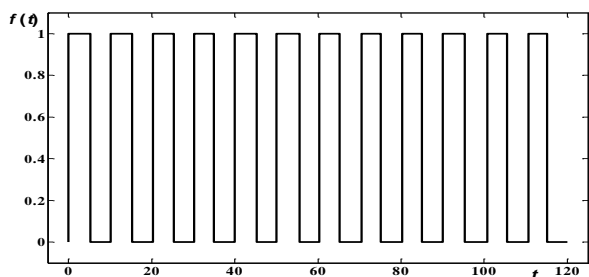


Рис. 2

Импульсы имеют прямоугольную форму, одинаковую амплитуду, равную 1, и период появления  $T_0$ . Продолжительности импульсов и пауз между ними одинаковы и равны  $T_0 / 2$ .

При использовании модели I результат моделирования поведения НМ под действием такого периодического воздействия на него показан на рис. 3 (рис. 3 – реакция НМ под действием периодической импульсной внешней нагрузки (модель I)).

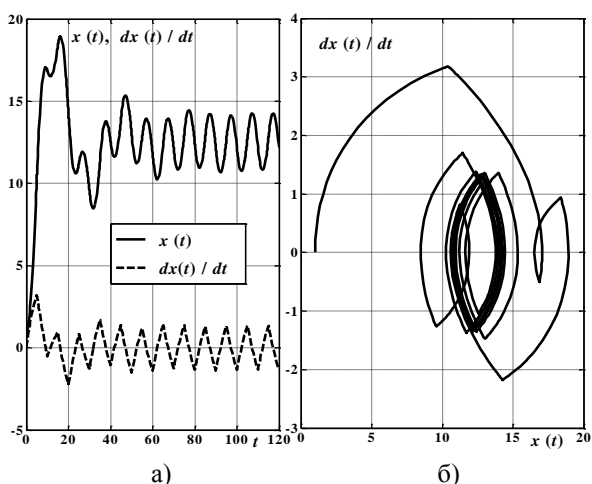


Рис. 3

Видно, что после переходного процесса НМ периодически меняет свое состояние в

соответствии с действием внешней периодической нагрузки. При этом не происходит уменьшения внутренней энергии до нуля. Это объясняется тем, что параметры модели НМ остаются постоянными во времени, а внешняя нагрузка "подпитывает" систему энергией.

В реальности любой материал, в том числе и НМ, со временем теряет свои упругие свойства, что приводит к необратимому изменению его формы.

Для включения в модель этого эффекта введем в модель I зависимость параметров от времени. Очевидно, что упругость НМ со временем уменьшается. Смоделируем это уменьшение функцией,  $a(t) = a_0 \exp(-t / T_a) + a_1$ . Здесь вводится новый параметр  $T_a$  – характерное время уменьшения коэффициента упругости до минимального значения (полное время  $(3 - 4) T_a$ ). Параметр  $a_1$  задает остаточное значение коэффициента упругой составляющей деформации. При этом его начальное значение равно  $a_0 + a_1$ .

Зададим также вместо постоянного параметра  $b$  переменную, зависящую от времени. Из экспериментальных результатов следует, что величина диссипации энергии в НМ под действием нагрузок постепенно нарастает. Это означает, что параметр  $b$  должен постепенно увеличиваться. Смоделируем это нарастание функцией  $b(t) = b_0 (1 - \exp(-t/T_b))$ .

Здесь параметр  $T_b$  – характерное время увеличения коэффициента диссипации до наибольших значений. В соответствии с этой функцией диссипация внутренней энергии в материале постепенно увеличивается от нуля при  $t = 0$  до некоторого предельного значения, которое задается значением параметра  $b_0$ .

Модификация модели I приводит к модели II:

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b_0 \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_b}\right) \right) \frac{dx(t)}{dt} + \left( a_0 \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) + a_1 \right) x(t) = f(t). \quad (2)$$

Рассмотрим численное решение этого уравнения при тех же начальных условиях  $x(t=0) = 1$  и  $dx(t=0)/dt = 0$  и периодической функции  $f(t)$ , состоящей из последовательности одинаковых прямоугольных импульсов единичной амплитуды с периодом следования  $T_0$  и длительностью  $T_0/2$ .

На рис. 4 (рис. 4 – реакция нетканого материала под действием периодической импульсной внешней нагрузки (модель II)) показаны графики функций деформации, скорости деформации, импульсов внешней нагрузки на НМ и фазовая траектория изменения состояний НМ во времени.

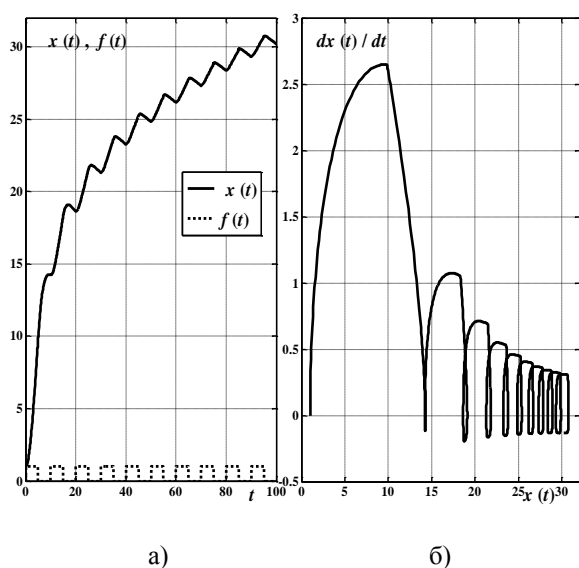


Рис. 4

Анализ кривых (рис.4) показал, что сначала войлок в большей степени реагирует своей упругой составляющей сопротивлением деформации, пытаясь восстановить свою форму после действия нагрузки. Затем начинает нарастать пластическая составляющая, которая увеличивается либо до предела, определяющего разрушение материала в моделируемой локальной области (этот вариант в модели не учтен), либо до достижения некоторого предельного среднего уровня (на приведенных графиках этот предел не достигнут), вокруг которого продолжают малые упругие колебания за счет сохранившейся в материале остаточной упругой составляющей. Фазовая траектория показывает ту же динамику более наглядно с точки зрения диссипации энергии материала.

При формировании валяльно-войлочного материала структура взаимного расположения и взаимодействия волокон приводит к сохранению в волокнах запаса потенциальной энергии упругой деформации. Многочисленные контакты между волокнами предотвращают диссипацию этой механической энергии в тепловую энергию.

В результате эксплуатации со временем и под действием внешних механических, радиационных, влаготепловых факторов происходит диссипация остаточной механической энергии волокон вследствие изменения физико-механических свойств полимерного вещества волокон и контактного взаимодействия между волокнами.

Предложена простая нестационарная динамическая модель процесса диссипации остаточной механической энергии в нетканом материале. Модель позволяет оценить влияние упругой, эластической и пластической частей деформации войлока на скорость и особенности динамики деформации материала во времени и диссипации внутренней энергии материала. Предложенная модель станет вкладом авторов в теорию поведения обувных материалов, что позволит учесть результаты при разработке адресной технологии производства обуви с желаемыми свойствами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Леденева И.Н., Зарицкий Б.П. Оценка полуцикловых характеристик валяльно-войлочных материалов // Дизайн и технологии. – 2013, № 33 (75).
2. Леденева И.Н., Зарицкий Б.П. Формуемость и формоустойчивость обуви с верхом из войлока // Дизайн и технологии. – 2014, № 42 (84).
3. Леденева И.Н., Гинзбург Л.И. Методика прогнозирования гигиенических свойств обуви с верхом из войлока // Дизайн и технологии. – 2016, №49 (91).
4. Севостьянов П.А., Самойлова Т.А. Особенности проявления флуктуационно-диссипационной теоремы в процессах релаксации волокнистых материалов при действии сил сухого и вязкого трения с учетом их статистических особенностей // Современные технологии хранения, обработки и анализа больших данных // Сб. научн. тр. кафедры автоматизированных систем обработки информации и

управления. – М.: РГУ имени А.Н. Косыгина, 2021. С. 100...104. – EDN HBNPPT.

5. *Sevost'yanov P.A., Seryakova T.V.* Study of deformation of nonwoven fibre material during needle-punching // *Fibre Chemistry*. – 2009. Vol. 41. No 1. P.38...40. – DOI 10.1007/s10692-009-9116-z. – EDNUEMFUX.

6. *Севостьянов А.Г., Элькина Т.Н.* Методы исследования неровноты плоских текстильных материалов. – М.: Легкая индустрия, 1975.

7. *Черкасский А.Е.* Теоретические основы и повышение эффективности процессов формирования волокнистых холстов и нетканых материалов на их основе: Дис. ... докт.техн. наук. – М., 1985.

8. *Севостьянов П.А.* Компьютерные модели в механике волокнистых материалов. – М.: Тисо-Принт, 2013. ISBN 978-5-9904852-1-1

9. *Севостьянов П.А.* Динамика и модели основных процессов прядения: рыхление, очистка, смешивание, кардо- и гребнечесание, вытягивание, дискретизация, штапельирование, кручение, намотка, перематка. – М.: Клуб-Печати, 2021. ISBN 978-5-9904852-5-9.

10. *Жихарев А.П.* Теоретические основы и экспериментальные методы исследований для оценки качества материалов при силовых, температурных и влажностных воздействиях. – М.: ИИЦ МГУДТ, 2003.

11. *Леденева И.Н., Белгородский В. С.* Валяльно-войлочные материалы: строение, свойства, перспективы использования. – М.: РГУ имени А.Н. Косыгина, 2021.

12. *Mandhyan P.K., Nachane R.P., Banerjee S., Pawar B.R., Koli H.S.* Nonlinear Maxwell modelling of inverse relaxation in yarns and fabrics // *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. – Vol.42, June 2017.P.168...174.

13. *Rupayan Roy, S.M. Ishtiaque.* Effect of fibre orientation on mechanical and functional properties of needle-punched nonwoven // *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. – Vol.44, September 2019. P.321...328.

14. *Koviljka A Asanovich, Mirjana M Kostic, Tatjana V Mihailovic, Dragana D Cerovic.* Compression and strength behaviour of viscose/polypropylene nonwoven fabrics // *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. – Vol.44, September 2019.P.329...337.

15. *Piotr Szablewski.* Estimating engineering constants of a selected model of textile composite // *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. Vol.40, September 2015.P.236...242.

16. *Nachane R.P.* Yarn hairiness – Theory about total number of fibre hair // *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. – Vol.41, Desember 2016. P.440...443.

17. *Gupta V.K., Srivastava R.K.* Mechanical, thermal and dynamic mechanical analysis of jute fibre reinforced epoxy composite // *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. – Vol.42, March 2017.P.64...71.

18. *Mehran Dadgar, S. Mohammad Hosseini Var-kani, Ali Akbar Marati.* Pin-point effect determination using a rigorous approach // *Indian Journal of Fibre &*

*Textile Research*. – Vol.40, September 2015. P.273...281.

19. *Ledeneva I.N., Simachev D.N.* Shape stability of shoes with decorated felt uppers// Serbia, Belgrade. Textile industry. – 2015, № 2.

## REFERENCES

1. *Ledeneva I.N., Zaritsky B.P.* Estimation of semi-cycle characteristics of felt materials // *Design and technologies*. - 2013. No. 33 (75).

2. *Ledeneva I.N., Zaritsky B.P.* Formability and shape stability of shoes with felt uppers // *Design and technology*. - 2014. No. 42 (84).

3. *Ledeneva I.N., Ginzburg L.I.* Method for predicting the hygienic properties of shoes with felt uppers // *Design and technology*. - 2016. No. 49 (91).

4. *Sevostyanov P.A., Samoilova T.A.* Peculiarities of manifestation of the fluctuation-dissipation theorem in the processes of relaxation of fibrous materials under the action of dry and viscous friction forces, taking into account their statistical features // *Modern technologies of storage, processing and analysis big data: collection of scientific papers of the department of automated information processing and control systems*. - M.: FGBOU VO "RGU im. A.N. Kosygin", 2021. P.100...104. – EDN HBNPPT.

5. *Sevost'yanov P.A., Seryakova T.V.* Study of deformation of nonwoven fiber material during needle-punching / P. A. Sevost'yanov, // *Fiber Chemistry*. - 2009. - Vol. 41. No 1. P. 38...40. – DOI 10.1007/s10692-009-9116-z. – EDN UEMFUX.

6. *Sevostyanov A.G., Elkina T.N.* Methods for studying the unevenness of flat textile materials. – Moscow: Light industry, 1975.

7. *Cherkassky A.E.* Theoretical foundations and increasing the efficiency of the processes of formation of fibrous canvases and non-woven materials based on them: Abstract of the thesis. ... Doctor of Technical Sciences. - Moscow, 1985.

8. *Sevostyanov P.A.* Computer models in the mechanics of fibrous materials. – Moscow: Tiso Print, 2013. ISBN 978-5-9904852-1-1

9. *Sevostyanov P.A.* Dynamics and models of the main spinning processes: loosening, cleaning, mixing, carding and combing, drawing, discretization, stapling, twisting, winding, rewinding. - Moscow: Club-Prints, 2021. ISBN 978-5-9904852-5-9.

10. *Zhikharev A.P.* Theoretical foundations and experimental research methods for assessing the quality of materials under force, temperature and humidity effects.– M.: IITs MGUDT, 2003.

11. *Ledeneva I.N., Belgorodsky V.S.* Felt materials: structure, properties, prospects for use. - M.: RGU im. A.N. Kosygin, 2021.

12. *Mandhyan P.K., Nachane R.P., Banerjee S., Pawar B.R., Koli H.S.* Nonlinear Maxwell modelling of inverse relaxation in yarns and fabrics // *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. – Vol.42, June 2017.P.168...174.

13. *Rupayan Roy, S.M. Ishtiaque.* Effect of fibre orientation on mechanical and functional properties of

needle-punched nonwoven // Indian Journal of Fibre & Textile Research. – Vol.44, September 2019. P.321...328.

14. Koviljka A Asanovich, Mirjana M Kostic, Tatjana V Mihailovic, Dragana D Cerovic. Compression and strength behaviour of viscose/polypropylene nonwoven fabrics // Indian Journal of Fibre & Textile Research. – Vol.44, September 2019. P.329...337.

15. Piotr Szablewski. Estimating engineering constants of a selected model of textile composite // Indian Journal of Fibre & Textile Research. – Vol.40, September 2015. P.236...242.

16. Nachane Yarn hairiness – Theory about total number of fibre hair // Indian Journal of Fibre & Textile Research. – Vol.41, December 2016. P.440...443.

17. Gupta V.K., Srivastava R.K. Mechanical, thermal and dynamic mechanical analysis of jute fibre

reinforced epoxy composite // Indian Journal of Fibre & Textile Research. – Vol.42, March 2017. P.64...71.

18. Mehran Dadgar, S. Mohammad Hosseini Varkani, Ali Akbar Marati. Pin-point effect determination using a rigorous approach // Indian Journal of Fibre & Textile Research. – Vol.40, September 2015. P.273...281.

19. Ledeneva I.N., Simachev D.N. Shape stability of shoes with decorated felt uppers // Serbia, Belgrade. Textile Industry. – 2015, № 2.

Рекомендована кафедрой художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи. Поступила 29.12.22.

---