

## КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕКСТИЛЬНЫХ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ\*

### COMPUTER PREDICTION OF DEFORMATION MODES OF GEOTEXTILE NONWOVEN MATERIALS' OPERATION

*S.V. КИСЕЛЕВ, А.А. КОЗЛОВ, И.М. ЕГОРОВ*

*S.V. KISELEV, A.A. KOZLOV, I.M. EGOROV*

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: sergkise@mail.ru, aakozlov92@mail.ru, ivegoro@mail.ru

*Рассматриваются вопросы компьютерного прогнозирования деформационных режимов эксплуатации геотекстильных нетканых материалов, включая сложные деформационно-восстановительные режимы. В основе математической модели деформационно-эксплуатационных процессов геотекстильных нетканых материалов лежит спектрально-временная теория вязкоупругости. Практическое использование методов достоверного прогнозирования деформационно-эксплуатационных процессов геотекстильных нетканых материалов упрощается их цифровизацией.*

*The issues of computer prediction of deformation modes of geotextile nonwoven materials' operation, including complex deformation-recovery modes, are considered in the article. The basis of the mathematical model of geotextile nonwoven materials' deformation-operational processes is the spectral-temporal theory of viscoelasticity. The practical use of methods for reliable prediction of geotextile nonwoven materials' deformation-operational processes is simplified by their digitalization.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, прогнозирование, геотекстильные нетканые материалы, деформационные процессы, восстановительные процессы.

**Keywords:** mathematical modeling, forecasting, geotextile nonwoven materials, deformation processes, recovery processes.

Геотекстильные нетканые материалы занимают определенное место среди полимерных волокнистых текстильных материалов. Выделение этих материалов в особую группу продиктовано особенностью их макроструктуры, которую, в отличие от большинства других текстильных материалов, нельзя назвать упорядоченной. В то же время целесообразность исследования механических свойств нетканых материалов

определяется широкой областью их применимости.

Технология производства геотекстильных нетканых материалов позволяет использовать все виды текстильного сырья, в том числе низких сортов, короткоштапельные и непрядомые волокна, а также волокна, регенерированные из лоскута и тряпья, что выгодно экономически отличает их от других видов текстильных материалов [1].

\* Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ, Проект № FSEZ-2020-0005.

Достаточно большой группой геотекстильных нетканых материалов являются иглопробивные нетканые материалы. Некоторые области их применения: земляное, дорожное и железнодорожное строительство, строительство сооружений, аэропортов, дамб, набережных, туннелей, кровли, дренажа, искусственного дерна, теннисных кортов.

Иглопробивные нетканые материалы применяются для защиты берегов, для сельскохозяйственных целей, в качестве арматуры в строительных материалах, в машиностроении – для деталей оборудования, покрытия труб, литых элементов, тепло- и звукоизоляции, фильтров, бумагоделательных суков, полировального и абразивного фетра и т.д.

Для производства иглопробивных нетканых материалов используются все известные и создаваемые волокна, многие дисперсные, сыпучие, связующие вещества. Отдельно и в смесках применяются натуральные, искусственные, синтетические, минеральные, стеклянные волокна [2].

Из синтетических волокон наибольшее применение находят полиамидные, полиэфирные, полипропиленовые волокна. Из натуральных волокон применяют хлопок и шерсть, дающие прекрасные результаты в иглопробивной технологии изготовления геотекстильных нетканых материалов. Из искусственных волокон используют вискозу. Применяют различные новые и восстановленные волокна, моноволокна, филamentные нити.

Разработка методов математического моделирования и цифрового прогнозирования деформационно-эксплуатационных процессов иглопробивных нетканых материалов является актуальной задачей, решение которой способствует выпуску геотекстильных нетканых материалов, обладающих требуемыми вязкоупругими свойствами [3].

Иглопробивные нетканые материалы перспективны для повышения эффективности и снижения стоимости работ, например, при строительстве дорог, сооружений различного назначения и т.п. Поэтому необходимо развитие научных концепций и

выработка практических рекомендаций по технологическому отбору материалов, созданию новых и совершенствованию существующих структур иглопробивных нетканых материалов. В первую очередь это относится к иглопробивным нетканым материалам на основе синтетических волокнистых отходов, которые представляют наибольший технико-экономический и экологический интерес в различных областях промышленного строительства [4].

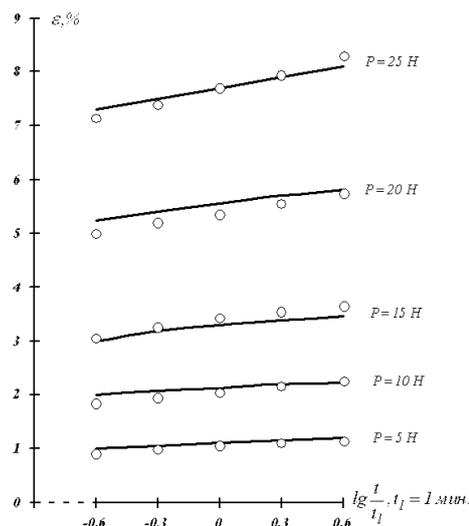


Рис. 1

В результате серий экспериментов в режимах деформационных процессов для нетканых материалов были получены "семейства" кривых ползучести (рис. 1 – "семейство" кривых ползучести иглопробивного нетканого материала (линии – эксперимент, точки – расчет по математической модели (2)...(6))), которые в дальнейшем перестраивались в "семейства" кривых податливости, (рис. 2 – "семейство" кривых податливости иглопробивного нетканого материала (линии – эксперимент, точки – расчет по математической модели (2)...(6))) на основе формулы [5]:

$$F^{-1}D_{pt} = \frac{\varepsilon_{pt} - \varepsilon_{p,ост.}}{P}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{pt}$  – деформация, зависящая от растягивающего усилия  $P$  и времени деформирования  $t$ ;  $D_{pt}$  – податливость;  $F$  – площадь

поперечного сечения образца материала;  $\varepsilon_{p \text{ ост}}$  – остаточная деформация, определяемая по деформационно-восстановительному процессу.

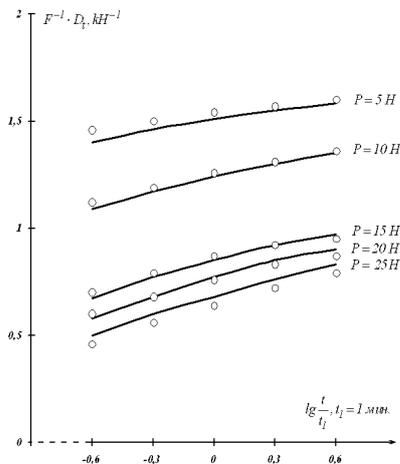


Рис. 2

Микроструктура иглопробивного нетканого материала существенным образом отличается от микроструктуры синтетических нитей и тканей. Поэтому для прогнозирования деформационных и восстановительных процессов иглопробивных нетканых материалов нельзя без соответствующего анализа и расчетной проверки использовать математические модели, успешно применяемые для прогнозирования деформационных и восстановительных процессов нитей и тканей [6].

Для прогнозирования деформационных и восстановительных процессов иглопробивных нетканых материалов была предложена новая математическая модель, учитывающая особенности их микроструктуры.

Проведенное исследование деформационных и восстановительных процессов показало, что среднестатистические времена запаздывания иглопробивных нетканых материалов, характеризующие переходы условных микрочастиц материала из одного устойчивого положения в другое, достаточно малы, т.е. такие переходы осуществляются достаточно быстро – за времена  $\tau_p$ , много меньшие, чем величина базового лабораторного времени  $t_1 = 1$  мин [7].

Данное обстоятельство явилось основанием для учета в математической модели

податливости  $D_{pt}$  только неотрицательных значений логарифмическо-временной шкалы приведенного времени  $\ln(t/\tau_p)$  ( $t \geq \tau_p$ ), а для отрицательных значений указанной логарифмической шкалы ( $t < \tau_p$ ) – с целью упрощения модели податливость принимается равной нулю. Предлагаемая математическая модель податливости имеет вид:

$$F^{-1}D_{pt} = F^{-1}D_{\infty}\varphi_{pt}, \quad (2)$$

$$\varphi_{pt} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{\pi}} a_n \int_0^{\frac{1}{a_n} \ln \frac{t}{\tau_p}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz, & t > \tau_p \\ 0, & t \leq \tau_p \end{cases}, \quad (3)$$

где  $D_{\infty}$  – квазиравновесное значение податливости материала;  $0 \leq \varphi_{pt} \leq 1$  – нормированная функция, заданная в виде удвоенного интеграла вероятности;  $\tau_p$  – среднестатистическое время запаздывания;  $a_n$  – параметр интенсивности деформационного процесса.

Следует заметить, что сделанное допущение о нулевом значении податливости при временах, меньших среднестатистических времен запаздывания, не принципиально, в силу их особой малости. К тому же процесс прогнозирования деформационных и восстановительных процессов предполагает рассмотрение временных интервалов, сопоставимых с реальным значением базового времени [8].

Для предлагаемой математической модели податливости наибольшее значение производной податливости соответствует значению нормированной  $\varphi = 0$ , то есть  $t = \tau_p$ , что позволяет определить значение структурного коэффициента  $a_n$  [9]:

$$\frac{1}{a_n} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(\partial D_{pt} / \partial \ln t) \Big|_{\max}}{D_{\infty}}, \quad (4)$$

при этом асимптотическое значение квазиравновесной податливости  $D_{\infty}$  определяется как обратная величина модуля вязкоупругости  $E_{\infty}$  по диаграмме растяжения [10]:

$$D_{\infty} = E_{\infty}^{-1}. \quad (5)$$

Третьим параметром предлагаемой математической модели деформационного процесса является функция времен запаздывания  $f_p$ :

$$f_p = \ln \frac{\tau_p}{t_1} < 0. \quad (6)$$

Функция времен запаздывания  $f_p$  определяется по величине сдвигов кривых "семейства" податливости до обобщенной кривой податливости:

$$\ln \frac{t}{t_1} = \ln \frac{t}{\tau_p} + \ln \frac{\tau_p}{t_1}. \quad (7)$$

Функцию  $f_p$  можно интерпретировать как силовременную аналогию, суть которой заключается в увеличении времени запаздывания при увеличении растягивающего усилия, т.е. оказания тормозящего действия на подвижность запаздывающих частиц материала [11].

Такой характер нелинейной деформационных и восстановительных процессов нетканого материала полезно сопоставить с противоположным характером нелинейности деформационных и восстановительных процессов синтетических волокон, у которых нагрузка оказывает, наоборот, активирующее действие на времена запаздывания, понижая их значения [12].

Это отличие вызвано отсутствием упорядоченной микроструктуры материала, в связи с чем силовой фактор не является определяющим при деформировании [13].

Заметим, что определение квазиравновесной податливости  $D_{\infty}$  по первому участку диаграммы растяжения (соответствующему зоне эксплуатации материала с незначительными разрушающими воздействиями) компенсирует "ошибку" выбора "нулевого" значения начальной податливости [14].

Для проверки адекватности построенной математической модели деформацион-

ных и восстановительных процессов производилось сопоставление расчетных значений податливости с измеренными экспериментально, что отражено на графиках "семейств" ползучести и податливости (рис. 1, рис. 2).

Близость расчетных точек к экспериментальным кривым подтверждает адекватность и надежность построенной математической модели деформационных и восстановительных процессов [15].

Следует особо отметить преимущество предлагаемой модели, которое состоит в минимальном количестве параметров модели, которые являются одновременно деформационными характеристиками исследуемого материала.

Для удобства прогнозирования и определения деформационных характеристик по предлагаемым методам разработано программное обеспечение [16...20].

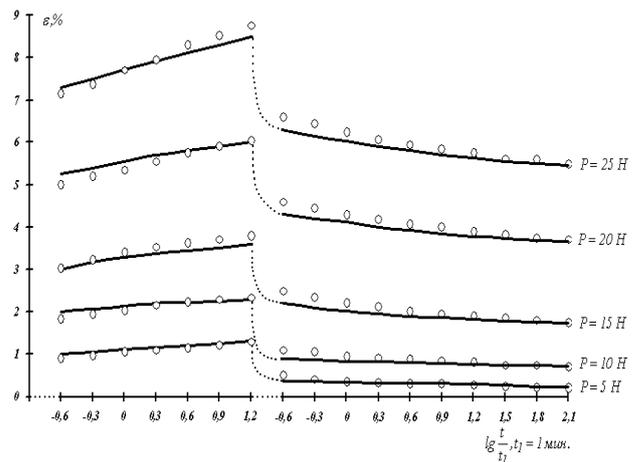


Рис. 3

На основе математической модели деформационных и восстановительных процессов разработаны методики прогнозирования этих процессов иглопробивных нетканых материалов.

Указанное прогнозирование основано на применении общего уравнения нелинейно-наследственной ползучести Больцмана-Вольтерра, модификация которого в рамках предлагаемой модели имеет вид [21]:

$$\varepsilon_t = F^{-1} D_{\infty} \int_{\ln \tau_p}^{\ln t} P_{t-s} \phi'_{ps} d \ln s. \quad (8)$$

В зависимости от варианта деформационных и восстановительных процессов предлагаются различные методики численного прогнозирования. Например, при активном процессе, которому соответствует ярко выраженный рост скорости нагружения, предлагается разбиение обратной временной шкалы  $s$  в виде возрастающей геометрической прогрессии, чтобы наилучшим образом учесть быстрорастущие вклады приложенной нагрузки  $P_{t-s}$  [22].

Наоборот, при численном прогнозировании длительных деформационных процессов, характеризующимся малым изменением скорости нагружения во времени, предлагается разбиение обратной временной шкалы  $s$  проводить в убывающей геометрической прогрессии, так как нагрузка мало меняется с увеличением времени, а наиболее существенными будут вклады приложенной нагрузки в начале процесса [23].

Прогнозирование деформационных процессов иглопробивных нетканых материалов становится точнее и проще с применением вычислительной техники. Пример расчета деформационно-восстановительного процесса с полной разгрузкой приведен на рис. 3 (деформационно-восстановительный процесс с полной разгрузкой иглопробивного нетканого материала (линии - эксперимент, точки – расчет по формуле (8))).

На основе методов прогнозирования деформационных и восстановительных процессов иглопробивных нетканых материалов разработано соответствующее программное обеспечение.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена математическая модель деформационного процесса иглопробивных нетканых материалов в зоне действия неразрушающих механических воздействий.

2. Разработаны методы определения параметров деформационного процесса иглопробивных нетканых материалов в рамках предложенной математической модели.

3. Разработаны методы прогнозирования деформационных и восстановительных

процессов иглопробивных нетканых материалов.

4. Разработанные методы определения деформационных параметров, а также прогнозирования деформационных и восстановительных процессов иглопробивных нетканых материалов позволяют решать задачи технологической направленности по отбору материалов, обладающих наилучшими, с точки зрения эксплуатационных свойств, параметрами в зависимости от характеристик материала (поверхностной плотности, толщины, количества пробивок на единицу площади и т.д.).

5. На основе методов определения деформационных параметров, а также прогнозирования деформационных и восстановительных процессов иглопробивных нетканых материалов, разработано программное обеспечение, способствующее наилучшему решению указанных выше технологических задач по отбору материалов и прогнозированию деформационных и восстановительных процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Егорова М.А., Макарова А.А., Коновалов А.С., Максимов В.В. Применение методов спектрального моделирования и компьютерного прогнозирования вязкоупругости для оценки функциональности нетканых полимерных материалов//Химические волокна. – 2020, № 3. С. 85...88.
2. Макаров А.Г. Контроль параметров нелинейно-наследственных ядер релаксации и запаздывания синтетических нитей//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, № 2. С.12...16.
3. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки релаксационных процессов полимерных текстильных материалов с целью оценки их эксплуатационных свойств // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2020, № 1. С. 80...88.
4. Сталевич А.М., Макаров А.Г. Вариант спектра наследственно-вязкоупругой релаксации синтетических нитей// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, № 3. С. 8...13.
5. Переборова Н.В. Применение критериев качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов для оценки их функциональности//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2020, № 1. С.101...110.

6. Макаров А.Г. Определение аналитической взаимосвязи нормированных ядер релаксации и ползучести в линейной теории вязкоупругости текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002, № 2, С. 13...17.

7. Переборова Н.В. Разработка методов качественной оценки эксплуатационных процессов материалов текстильной и легкой промышленности с целью повышения их функциональности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2020, № 2, С. 144...155.

8. Макаров А.Г., Сталевич А.М. Прогнозирование восстановительного деформационного процесса и обратной релаксации полимерных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002, № 3. С. 10...13.

9. Переборова Н.В. Методология компьютерного моделирования деформационно-релаксационных процессов полимерных текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. – 2017, № 2 (30). С. 33...42.

10. Сталевич А.М., Макаров А.Г., Саидов Е.Д. Упругие компоненты диаграммы растяжения синтетической нити // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002, № 4-5. С. 15...18.

11. Переборова Н.В. Повышение конкурентоспособности арамидных текстильных материалов на основе качественного анализа их эксплуатационно-деформационных свойств // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. – 2017, № 4 (32). С. 123...132.

12. Сталевич А.М., Макаров А.Г., Саидов Е.Д. Релаксационная спектроскопия синтетической нити // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2003, № 1. С. 16...22.

13. Переборова Н.В. Повышение качества продукции текстильной и легкой промышленности на основе внедрения информационных технологий в научные исследования // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. – 2015, № 4. С. 53...62.

14. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Методы компьютерного анализа вязкоупругости технических тканей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 3. С. 13...17.

15. Переборова Н.В. Разработка инновационных методов контроля эксплуатационных свойств и повышения качества материалов текстильной и легкой промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2015, т. 29, № 3, С. 11...19.

16. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Исследование изменений деформационных свойств полиэфирных нитей в зависимости от степени крутки // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 4. С. 9...13.

17. Переборова Н.В. Разработка критериев качественной оценки функционально-потребительских свойств продукции текстильной и легкой промышленности с целью управления качеством продукции // Материалы. Дизайн. Технология. – 2015, № 4 (39). С. 84...92.

18. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Критерии оптимального выбора математической модели вязкоупругости текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 5. С. 18...22.

19. Переборова Н.В. Разработка стратегической программы создания инжинирингового центра текстильной и легкой промышленности // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2015, т. 29, № 3. С. 35...42.

20. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Определение механических характеристик текстильных материалов при переменной температуре // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 6. С. 14...19.

21. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Компьютерное прогнозирование деформационных процессов текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 2. С. 14...18.

22. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Системный анализ вязкоупругости текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 3. С. 20...24.

23. Макаров А.Г., Демидов А.В., Новоселова А.Г., Сталевич А.М. Методы спектрального моделирования механической релаксации текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 1С. С. 15...19.

## REFERENCES

1. Egorova M.A., Makarova A.A., Kononov A.S., Maksimov V.V. Application of methods of spectral modeling and computer prediction of viscoelasticity to assess the functionality of non-woven polymer materials // Chemical fibers. - 2020, № 3, P. 85 ... 88.

2. Makarov A.G. Control of the parameters of non-linear hereditary nuclei of relaxation and delay of synthetic threads // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2000, № 2, P. 12 ... 16.

3. Pereborova N.V. Criteria for a qualitative assessment of the relaxation processes of polymeric textile materials in order to assess their performance properties // Vestnik of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and technical sciences. - 2020, № 1, P. 80 ... 88.

4. Stalovich A.M., Makarov A.G. A variant of the spectrum of hereditary-viscoelastic relaxation of synthetic threads // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2000, № 3, P. 8 ... 13.

5. Pereborova N.V. Application of criteria for a qualitative assessment of the relaxation properties of

polymeric textile materials to assess their functionality // Vestnik of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technology. - 2020, № 1, P. 101 ... 110.

6. *Makarov A.G.* Determination of the analytical relationship between normalized relaxation and creep kernels in the linear theory of viscoelasticity of textile materials. // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2002, № 2, P. 13 ... 17.

7. *Pereborova N.V.* Development of methods for qualitative assessment of the operational processes of textile and light industry materials in order to increase their functionality // Vestnik of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technology. - 2020, № 2, P. 144 ... 155.

8. *Makarov A.G., Stalevich A.M.* Prediction of the recovery deformation process and reverse relaxation of polymeric materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2002, № 3, P. 10 ... 13.

9. *Pereborova N.V.* Methodology of computer simulation of deformation-relaxation processes of polymeric textile materials // Vestnik of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical sciences. - 2017, № 2 (30), P. 33 ... 42.

10. *Stalevich A.M., Makarov A.G., Saidov E.D.* Elastic components of the tension diagram of a synthetic thread. // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2002, № 4-5, P. 15 ... 18.

11. *Pereborova N.V.* Increasing the competitiveness of aramid textile materials based on a qualitative analysis of their performance and deformation properties // Vestnik of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical sciences. - 2017, № 4 (32), P. 123 ... 132.

12. *Stalevich A.M., Makarov A.G., Saidov E.D.* Relaxation spectrometry of a synthetic thread // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2003, № 1, P. 16 ... 22.

13. *Pereborova N.V.* Improving the quality of textile and light industry products based on the introduction of information technology in scientific research //

Vestnik of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical sciences. - 2015, № 4, P. 53 ... 62.

14. *Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M.* Methods of computer analysis of viscoelasticity of technical fabrics // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2006, № 3, P. 13 ... 17.

15. *Pereborova N.V.* Development of innovative methods for monitoring performance properties and improving the quality of textile and light industry materials // The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry. - 2015, vol. 29, № 3, P. 11 ... 19.

16. *Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M.* Investigation of changes in the deformation properties of polyester yarns depending on the degree of twist // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2006, № 4, P. 9 ... 13.

17. *Pereborova N.V.* Development of criteria for the qualitative assessment of the functional and consumer properties of textile and light industry products for the purpose of product quality management // *Materials. Design. Technology.* - 2015, № 4 (39), P. 84 ... 92.

18. *Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M.* Criteria for the optimal choice of a mathematical model of viscoelasticity of textile materials. // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2006, № 5, P. 18 ... 22.

19. *Pereborova N.V.* Development of a strategic program for the creation of an engineering center for textile and light industry // The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry. - 2015, vol. 29, № 3, P. 35 ... 42.

20. *Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M.* Determination of the mechanical characteristics of textile materials at variable temperature // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2006, № 6, P. 14 ... 19.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации. Поступила 11.05.22.