

**СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ  
ВЯЗКОУПРУГОСТИ ГЕОТЕКСТИЛЬНЫХ НЕТКАНЫХ ПОЛОТЕН  
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ\***

**SPECTRAL ANALYSIS  
OF VISCOELASTICITY OF GEOTEXTILE NONWAVE TOWELS  
AND ITS APPLICATION FOR THE ESTIMATION OF THEIR FUNCTIONALITY**

*Н.В. ПЕРЕБОРОВА, А.В. ДЕМИДОВ, А.Г. МАКАРОВ, Н.С. КЛИМОВА*

*N.V. PEREBOROVA, A.V. DEMIDOV, A.G. MAKAROV, N.S. KLIMOVA*

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,  
Санкт-Петербургский государственный университет)

(Saint Petersburg State University of Industrial Technology and Design,  
Saint Petersburg State University)

E-mail: makvin@mail.ru

*На основе спектрального анализа вязкоупругости геотекстильных нетканых полотен разрабатываются методы математического моделирования и компьютерного прогнозирования деформационных процессов этих материалов. Рассмотрены также методы разделения полной деформации нетканых полотен на составные компоненты и их компьютерная реализация. Предлагаемые методы спектрального моделирования и компьютерного прогнозирования деформационных процессов позволяют через анализ формы спектров решить технологическую задачу отбора образцов материалов, обладающих необходимыми функциональными и эксплуатационными свойствами, что особенно важно на стадии проектирования и организации производства новых материалов с целью повышения их конкурентоспособности.*

*Based on the spectral analysis of the viscoelasticity of geotextile nonwoven fabrics, methods of mathematical modeling and computer prediction of the deformation processes of these materials are being developed. Methods for the separation of the total deformation of nonwovens into composite components and their computer implementation are also considered. The proposed methods of spectral modeling and computer prediction of deformation processes allow, through analyzing the shape of the spectra, to solve the technological problem of sampling materials with the necessary functional and operational properties, which is especially important at the design stage and organizing the production of new materials in order to increase their competitiveness.*

**Ключевые слова:** спектральный анализ, математическое моделирование, расчетное прогнозирование, вязкоупругость, нетканые полотна, геотекстильные материалы, функциональные свойства, эксплуатационное назначение, ползучесть, деформационные процессы.

---

\* Работа финансировалась в рамках выполнения базовой части государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № 11.4696.2017/8.9.

**Keywords: spectral analysis, mathematical modeling, computational forecasting, viscoelasticity, nonwoven fabrics, geotextile materials, functional properties, operational purpose, creep, deformation processes.**

Геотекстильные иглопробивные нетканые материалы являются достаточно большой группой среди нетканых материалов. Области их применения являются: земляное, дорожное и железнодорожное строительство, строительство сооружений, аэропортов, дамб, набережных, туннелей, кровли, дренажа, искусственного дерна, теннисных кортов. Геотекстильные 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 сукон, полировального и абразивного фетра и т.д.

Для производства геотекстильных иглопробивных нетканых материалов используются все известные и новые волокна, многие дисперсные, сыпучие, связующие вещества. Отдельно и в смесках применяются натуральные, искусственные, синтетические, минеральные, стеклянные волокна. Из синтетических волокон наибольшее применение находят полиамидные, полиэфирные, полипропиленовые волокна. Из натуральных волокон применяют хлопок и шерсть, дающую прекрасные результаты в иглопробивной технологии. Из искусственных волокон используют вискозу. Применяют различные новые и восстановленные волокна, моноволокна, филаментные нити [1...4].

Микроструктура иглопробивного нетканого полотна существенным образом отличается от микроструктуры синтетических нитей и тканей. Поэтому для прогнозирования ползучести, деформационных и восстановительных процессов иглопробивных нетканых полотен нельзя, без соответствующего анализа и расчетной проверки, использовать математические модели, успешно применяемые для полимерных нитей и тканей [5...8].

Для прогнозирования процесса ползучести иглопробивных нетканых полотен была предложена новая математическая модель,

учитывающая спектральные особенности их микроструктуры:

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

где  $D_{pt}$  – податливость;  $F$  – площадь поперечного сечения образца;  $D_{\infty}$  – квазиравновесное значение податливости материала;  $0 \leq \varphi_{pt} \leq 1$  – нормированная функция, заданная в виде удвоенного интеграла вероятности.

Одной из характеристик математической модели ползучести (1) является функция времен запаздывания  $f_p$ :

$$f_p = \ln \frac{\tau_p}{t_1} < 0, \quad (2)$$

где  $\tau_p$  – среднестатистическое время запаздывания;  $t_1$  – некоторое значение лабораторного времени (обычно принимают  $t_1 = 1$  мин).

График функции  $f_p$  можно интерпретировать как силовременную аналогию, суть которой заключается в увеличении времени запаздывания при увеличении растягивающего усилия, то есть оказании тормозящего действия на подвижность запаздывающих частиц материала. Такой характер нелинейной ползучести нетканого полотна полезно сопоставить с противоположным характером нелинейности ползучести синтетических волокон, у которых нагрузка оказывает, наоборот, активирующее действие на времена запаздывания, понижая их значения. Это отличие вызвано отсутствием упорядоченной микроструктуры материала, в связи с чем силовой фактор не является определяющим при деформировании [9...11].

Для примера, график спектральной функции времен запаздывания типичного образца геотекстильного нетканого материала – иглопробивного полотна из полипропиленовых волокон Пинема-160 (производства ОАО "Пинема", Беларусь, г. Пинск) приведен на рис. 1 (функция времен запаздывания иглопробивного полотна Пинема-160).

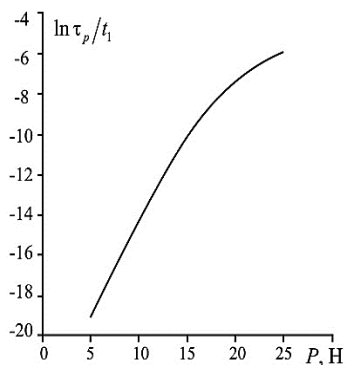


Рис. 1

На основе математической модели ползучести разработаны методики прогнозирования деформационных и восстановительных процессов иглопробивных нетканых полотен. Указанное прогнозирование основано на применении общего уравнения нелинейно-наследственной ползучести Больцмана-Вольтерра [4], модификация которого в рамках предлагаемой модели имеет вид [12]:

$$\varepsilon_t = F^{-1} D_{\infty} \int_{\ln \tau_p}^{\ln t} P_{t-s} \phi'_{ps} d \ln s. \quad (3)$$

В зависимости от варианта деформационного процесса 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  $P_{t-s}$  [13].

Наоборот, при численном прогнозировании длительного деформационного процесса, характеризующегося 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. Прогнозирование ползучести, деформационных и восстановительных процессов иглопробивных нетканых полотен становится точнее и проще с применением вычислительной техники. Пример расчета деформационно-восста-

новительного процесса с полной разгрузкой приведен на рис. 2 (деформационно-восстановительный процесс с полной разгрузкой (а – ползучесть; б – восстановление) иглопробивного полотна Пинема-160: 1 –  $P=5Н$ , 2 –  $P=10Н$ , 3 –  $P=15Н$ , 4 –  $P=20Н$ , 5 –  $P=25Н$  (линии – эксперимент, точки – расчет по формуле (3))).

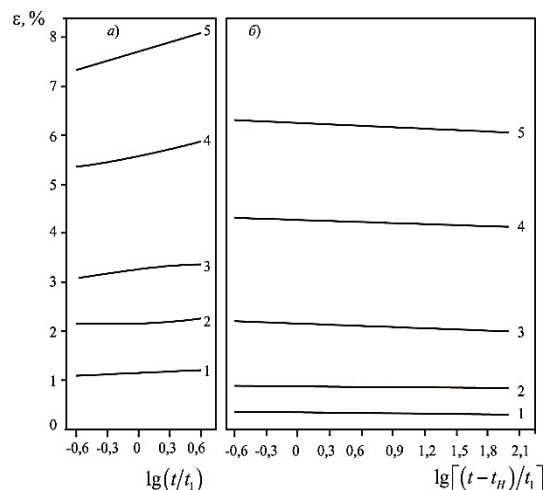


Рис. 2

Среди различных характеристик механических свойств геотекстильных нетканых полотен наибольшая информация содержится в деформационных и энергетических компонентах. В силу наибольшей доступности для исследований указанных характеристик целесообразно использовать работу деформирования, вычисляемую по полной диаграмме растяжения. Для условий эксплуатации иглопробивных нетканых полотен характерна лишь начальная зона деформирования, где существенных накоплений микроразрушений не происходит. В связи с этим более объективными следует считать механические характеристики, определяемые по измерениям именно в этой зоне механических воздействий. Это прежде всего упругая (обратимая) и вязкоупругопластическая (необратимая) компоненты механической работы и соответствующие им компоненты деформации. Энергетическая оценка механической работы деформирования иглопробивных нетканых полотен имеет важное значение для технологического отбора образцов материалов, обладающих определенными упругими и вязкоупругопластическими свойствами [14].

Известно, что полная деформация  $\varepsilon_t$  может быть условно разделена на три основные компоненты [15]:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_y + \varepsilon_{vy} + \varepsilon_{пл}, \quad (4)$$

где

$$\varepsilon_y = E_o^{-1} F^{-1} P_t \quad (5)$$

– упругая компонента;

$$\varepsilon_{пл.} \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_t (P = 0 \text{ Н}) \quad (6)$$

– пластическая компонента и

$$\varepsilon_{vy} = \varepsilon_t - \varepsilon_y - \varepsilon_{пл} \quad (7)$$

– вязкоупругая компонента.

По аналогии с этим можно разложить и полную механическую работу деформирования [16]:

$$a_t = \int_0^{\varepsilon_t} \sigma_t d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_t} F^{-1} P_t d\varepsilon \quad (8)$$

на упругую обратимую компоненту  $a_{t0}$  и вязкоупругопластическую необратимую компоненту  $a_{tt}$ , относительные доли которых выражаются формулами:

$$\frac{a_{t0}}{a_t} = \frac{P_t^2}{2E_o F \int_0^{\varepsilon_t} P_t d\varepsilon}, \quad (9)$$

$$\frac{a_{tt}}{a_t} = 1 - \frac{a_{t0}}{a_t} \quad (10)$$

и приведены на рис. 3 (относительные доли упругой  $a_{t0}/a_t$  и вязкоупругопластической  $a_{tt}/a_t$  компонент механической работы деформирования (Пинема-160)).

Методики разделения деформации и механической работы деформирования иглопробивных нетканых полотен на составные компоненты позволяют оценить упругие, вязкоупругие и пластические свойства материалов, что чрезвычайно важно при технологическом отборе образцов [17].

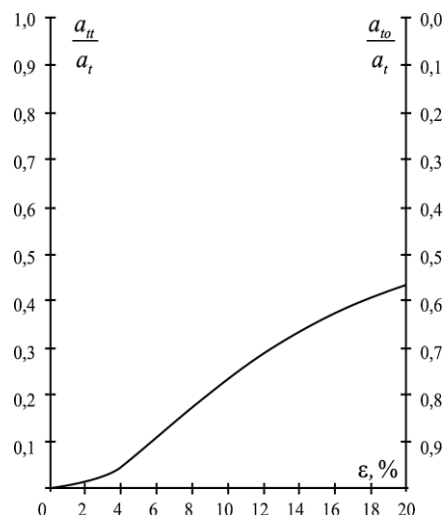


Рис. 3

В качестве примеров применения иглопробивных нетканых полотен Пинема можно привести дорожное строительство. Проведенные исследования материалов группы Пинема показали, например, что Пинема-400 отличается значительным преобладанием доли упругой составляющей механической работы деформирования. Его целесообразно применять на автодорогах с интенсивным движением, так как он быстрее других восстанавливает свою первоначальную форму и не имеет значительных разрушений своей микроструктуры. Однако на участках автодорог с повышенной аварийностью следует использовать материалы, у которых преобладает вязкоупругопластическая компонента деформации (например, Пинема-160), так как такие материалы обладают большей способностью гасить вредные механические воздействия [18].

Известно, что под спектром запаздывания понимается распределение числа запаздывающих частиц по собственным (внутренним) временам запаздывания. Исходя из определения спектра — он не привязан к лабораторному (внешнему) времени. Спектр запаздывания, по своей сути, есть плотность вероятностного распределения всех запаздывающих частиц материала. Для аналитического представления спектра вводится логарифмическая шкала безразмерного времени, привязанная к среднестатистическому времени запаздывания [19].

Спектр запаздывания  $Q_{pt}$  связан с податливостью  $D_{pt}$  через функцию запаздывания  $\varphi_{pt}$  формулой [20]:

$$\int_0^{\infty} Q_{pt} e^{-tx} dx = \frac{d\varphi_{pt}}{dt}. \quad (11)$$

Пример спектра запаздывания иглопробивного нетканого полотна приведен на рис. 4 (спектр времен запаздывания (Пинема-160)). В рамках рассматриваемой математической модели ползучести, форма спектра запаздывания определяется единственным параметром – интенсивностью процесса ползучести  $a_n$ .

Спектральный анализ ползучести позволяет выявить зависимости характеристик материалов от параметров математической модели ползучести, что чрезвычайно важно при проведении технологического отбора образцов материалов, обладающих теми или иными деформационными свойствами [21...24].

Для практической реализации разработанных методов спектрального моделирования и численного прогнозирования ползучести, деформационных и восстановительных процессов нетканых полотен был разработан программный продукт, позволяющий определять их функциональные и эксплуатационные свойства, а также проводить сравнительный анализ образцов исследуемых материалов.

Установлено влияние поверхностной плотности материала на форму спектра запаздывания – через значения структурного коэффициента интенсивности процесса ползучести  $a_n$ . Наибольшее значение интенсивности ползучести принимает у материала Пинема-400 ( $a_n = 21$ ), что соответствует более ярко выраженной форме спектра запаздывания, то есть данный материал обладает наибольшей долговечностью и наименее разрушается по сравнению с другими материалами при прочих равных условиях. И, наоборот, у материала Пинема-160 спектр запаздывания менее ярко выражен ( $a_n = 11$ ), что соответствует более рыхлой микроструктуре. Это обстоятельство связано, кроме всего прочего, с количеством проколов на

единицу площади при производстве нетканого материала. Мы видим, что у материала Пинема-400 количество проколов в 3 раза больше, чем у материала Пинема-160. В данном случае наблюдается "упрочнение" микроструктуры материала за счет большего числа пробивок. Однако заметное увеличение числа пробивок в другом случае может привести, наоборот, к уменьшению прочности материала (рис. 4).

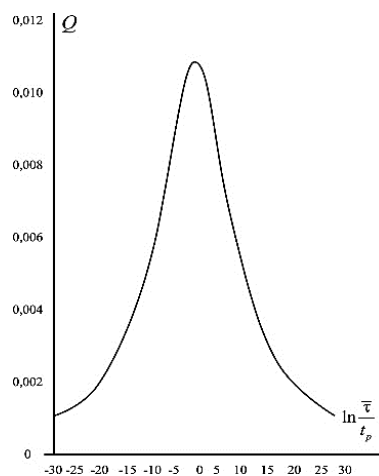


Рис. 4

Спектральное моделирование ползучести позволяет через анализ формы спектров запаздывания решить технологическую задачу отбора образцов материалов, обладающих необходимыми функциональными и эксплуатационными свойствами, что особенно важно на стадии проектирования новых материалов и организации их производства.

## ВЫВОДЫ

1. На основе новой модели ползучести геотекстильных нетканых полотен разработаны методики прогнозирования деформационно-восстановительных процессов этих материалов, учитывающие характер указанных процессов (равномерные, активные, длительные, многоступенчатые и др.).

2. Разработаны методики разделения полной деформации и, соответствующей ей, полной механической работы деформирования на упругую, вязкоупругую и пластическую компоненты, имеющие определяющее зна-

чение при качественной оценке эксплуатационных особенностей материала.

3. В рамках предложенной математической модели ползучести геотекстильных иглопробивных нетканых полотен разработана методика определения спектра времен запаздывания.

4. На основе методик выделения упругих, вязкоупругих и пластических компонент механической работы деформирования и полной деформации, а также вычисления спектров запаздывания геотекстильных иглопробивных нетканых полотен, разработано программное обеспечение, позволяющее компьютеризировать численное прогнозирование.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Макаров А.Г. Контроль параметров нелинейно-наследственных ядер релаксации и запаздывания синтетических нитей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, № 2. С. 12...16.
2. Сталевич А.М., Макаров А.Г. Вариант спектра наследственно-вязкоупругой релаксации синтетических нитей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, № 3. С. 8...13.
3. Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант прогнозирования процессов деформирования синтетических нитей // Химические волокна. – 2001, № 4. С. 67...69.
4. Макаров А.Г., Сталевич А.М. Методы уточнения и контроля прогнозируемых состояний синтетических материалов // Химические волокна. – 2001, № 5. С. 58...61.
5. Сталевич А.М., Макаров А.Г. Определение вязкоупругих характеристик на примере полиакрилонитрильной нити // Химические волокна. – 2001, № 6. С. 68...70.
6. Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант спектров релаксации и запаздывания у аморфно-кристаллических синтетических нитей // Химические волокна. – 2002, № 3. С. 52...55.
7. Макаров А.Г., Сталевич А.М. Прогнозирование восстановительного деформационного процесса и обратной релаксации полимерных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, № 3. С. 10...13.
8. 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.
9. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Компьютерное исследование вязкоупругости полимерных материалов // Химические волокна. – 2006, № 5. С. 38 ...43.
10. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Оптимизация выбора модели вязкоупругости синтетических нитей // Химические волокна. – 2006, № 6. С. 47...51.
11. 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.
12. 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.
13. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Системный анализ вязкоупругости текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 3. С. 20 ...24.
14. 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, № 1. С. 15...19.
15. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Системный анализ вязкоупругости полиэфирных нитей // Химические волокна. – 2007, № 1. С. 62...65.
16. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант математического моделирования деформационных процессов синтетических нитей // Химические волокна. – 2007, № 6. С. 49...52.
17. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант прогнозирования нелинейно-наследственной вязкоупругости полимеров // Прикладная механика и техническая физика. – 2007. Т. 48, №5. С. 147...157.
18. Макаров А.Г., Демидов А.В., Сталевич А.М. Вариант моделирования нелинейно-наследственной вязкоупругости полимерных материалов // Механика твердого тела. – 2009, № 1. С. 155...165.
19. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Демидов А.В., Вагнер В.И. Спектральный анализ релаксационных свойств полимерных нитей аморфно-кристаллического строения // Химические волокна. – 2013, № 5. С. 44...47.
20. Головина В.В., Рымкевич П.П., Макаров А.Г., Романова А.А. Прогнозирование деформационных и релаксационных процессов в одноосноориентированных полимерных материалах // Химические волокна. – 2013, № 6. С. 33...40.
21. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Васильева Е.К. Разработка методики проведения сравнительного анализа деформационных и релаксационных свойств арамидных нитей и текстильных материалов на их основе // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, № 5. С. 48...58.
22. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М. Разработка методов математического моделирования процессов релаксации и ползучести полимерных нитей на основе их спектральной интерпретации // Химические волокна. – 2017, № 1. С. 69...73.
23. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М. Разработка критериев достоверности прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных материалов // Химические волокна. – 2017, № 2. С. 59...63.

24. Демидов А.В., Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А. Варианты математического моделирования и системного анализа механической релаксации и ползучести полимерных материалов // Химические волокна. – 2017, № 4. С. 46...51.

#### REFERENCES

1. Makarov A.G. Kontrol' parametrov nelineyno-nasledstvennykh yader relaksatsii i zapazdyvaniya sinteticheskikh nitey // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2000, № 2. S.12...16.

2. Stalevich A.M., Makarov A.G. Variant spektra nasledstvenno-vyazkoupругoy relaksatsii sinteticheskikh nitey // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2000, № 3. S. 8...13.

3. Makarov A.G., Stalevich A.M. Variant prognozirovaniya protsessov deformirovaniya sinteticheskikh nitey // *Khimicheskie volokna.* – 2001, № 4. S. 67...69.

4. Makarov A.G., Stalevich A.M. Metody utochneniya i kontrolya prognoziruemyykh sostoyaniy sinteticheskikh materialov // *Khimicheskie volokna.* – 2001, №5. S. 58...61.

5. Stalevich A.M., Makarov A.G. Opredelenie vyazkoupругikh kharakteristik na primere poliakrilonitril'noy niti // *Khimicheskie volokna.* – 2001, №6. S.68...70.

6. Makarov A.G., Stalevich A.M. Variant spektrov relaksatsii i zapazdyvaniya u amorfno-kristallicheskikh sinteticheskikh nitey // *Khimicheskie volokna.* – 2002, № 3. S. 52...55.

7. Makarov A.G., Stalevich A.M. Prognozirovanie vosstanovitel'nogo deformatsionnogo protsessa i obratnoy relaksatsii polimernyykh materialov // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2000, № 3. S. 10...13.

8. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Metody komp'yuternogo analiza vyazkoupругosti tekhnicheskikh tkaney // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2006, № 3. S. 13...17.

9. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Komp'yuternoe issledovanie vyazkoupругosti polimernyykh materialov // *Khimicheskie volokna.* – 2006, № 5. S. 38 ...43.

10. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Optimizatsiya vybora modeli vyazkoupругosti sinteticheskikh nitey // *Khimicheskie volokna.* – 2006, №6. S. 47...51.

11. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Kriterii optimal'nogo vybora matematicheskoy modeli vyazkoupругosti tekstil'nykh materialov // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2006, № 5. S. 18 ...22.

12. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Komp'yuternoe prognozirovanie deformatsionnykh protsessov tekstil'nykh materialov // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2007, №2. S.14...18.

13. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Sistemnyy analiz vyazkoupругosti tekstil'nykh materi-

alov // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2007, № 3. S. 20 ...24.

14. Makarov A.G., Demidov A.V., Novoselova A.G., Stalevich A.M. Metody spektral'nogo modelirovaniya mekhanicheskoy relaksatsii tekstil'nykh materialov // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2007, № 1. S. 15...19.

15. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Sistemnyy analiz vyazkoupругosti poliefirnykh nitey // *Khimicheskie volokna.* – 2007, № 1. S. 62...65.

16. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Variant matematicheskogo modelirovaniya deformatsionnykh protsessov sinteticheskikh nitey // *Khimicheskie volokna.* – 2007, № 6. S. 49...52.

17. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Variant prognozirovaniya nelineyno-nasledstvennoy vyazkoupругosti polimerov // *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika.* – 2007. T. 48, №5. S. 147...157.

18. Makarov A.G., Demidov A.V., Stalevich A.M. Variant modelirovaniya nelineyno-nasledstvennoy vyazkoupругosti polimernyykh materialov // *Mekhanika tverdogo tela.* – 2009, № 1. S. 155...165.

19. Makarov A.G., Pereborova N.V., Demidov A.V., Vagner V.I. Spektral'nyy analiz relaksatsionnykh svoystv polimernyykh nitey amorfno-kristallicheskogo stroeniya // *Khimicheskie volokna.* – 2013, №5. S.44...47.

20. Golovina V.V., Rymkevich P.P., Makarov A.G., Romanova A.A. Prognozirovanie deformatsionnykh i relaksatsionnykh protsessov v odnoosnoorientirovannykh polimernyykh materialakh // *Khimicheskie volokna.* – 2013, № 6. S. 33...40.

21. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Vasil'eva E.K. Razrabotka metodiki provedeniya sravnitel'nogo analiza deformatsionnykh i relaksatsionnykh svoystv aramidnykh nitey i tekstil'nykh materialov na ikh osnove // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2015, № 5. S. 48...58.

22. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Razrabotka metodov matematicheskogo modelirovaniya protsessov relaksatsii i polzuchesti polimernyykh nitey na osnove ikh spektral'noy interpretatsii // *Khimicheskie volokna.* – 2017, № 1. S. 69...73.

23. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Razrabotka kriteriev dostovernosti prognozirovaniya deformatsionnykh i relaksatsionnykh protsessov polimernyykh materialov // *Khimicheskie volokna.* – 2017, № 2. S. 59...63.

24. Demidov A.V., Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A. Varianty matematicheskogo modelirovaniya i sistemnogo analiza mekhanicheskoy relaksatsii i polzuchesti polimernyykh materialov // *Khimicheskie volokna.* – 2017, № 4. S. 46...51.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации СПбГУПТД. Поступила 11.02.19.