

УДК 539.434:677.494

DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_2\_144

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
И СПЕКТРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО ТЕКСТИЛЯ\***

**DEVELOPMENT OF METHODS OF MATHEMATICAL MODELING  
AND SPECTRAL ASSESSMENT  
OF FUNCTIONAL PROPERTIES OF TECHNICAL TEXTILES**

*Н.В. ПЕРЕБОРОВА, А.Г. МАКАРОВ, М.А. ЕГОРОВА, И.М. ЕГОРОВ*

*N.V. PEREBOROVA, A.G. MAKAROV, M.A. EGOROVA, I.M. EGOROV*

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail makvin@mail.ru

*Разрабатываются методы математического моделирования и спектральной оценки функциональных свойств технического текстиля. Спектральная оценка функциональных свойств текстильных материалов позволяет получить значения среднестатистических времен релаксации, характеризующих релаксационные свойства указанных материалов, и значения среднестатистических времен запаздывания, характеризующих деформационные свойства этих материалов.*

*Methods of mathematical modeling and spectral estimation of the functional properties of technical textiles are being developed. A spectral estimation of the functional properties of textile materials allows one to obtain the values of the average relaxation times characterizing the relaxation properties of these materials, and the values of the average delay times characterizing the deformation properties of these materials.*

**Ключевые слова:** полимеры, технический текстиль, вязкоупругость, деформационно-эксплуатационные процессы, математическое моделирование, релаксация, упругость, вязкоупругость, спектр релаксации, спектр запаздывания.

---

\* Работа финансировалась в рамках выполнения базовой части государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2020-0005.

**Keywords: polymers, technical textiles, viscoelasticity, deformation-operational processes, mathematical modeling, relaxation, elasticity, viscoelasticity, relaxation spectrum, delay spectrum.**

В основе исследования функциональных свойств технического текстиля лежит математическое моделирование основополагающих вязкоупругих процессов этих материалов – релаксации и ползучести. Одним из развиваемых вариантов математического моделирования вязкоупругости текстильных материалов является вариант, основанный на аналитической аппроксимации экспериментальных "семейств" кривых релаксации и ползучести с помощью различных нормированных релаксационных функций и функций запаздывания по логарифмической шкале приведенного времени [1].

Увеличение разнообразия текстильных материалов, обладающих той или иной молекулярной и надмолекулярной структурой и проявляющих, в силу сказанного, те или иные функциональные свойства, способствует совершенствованию имеющихся и разработке новых, более точных, математических моделей, описывающих те или иные функциональные свойства указанных материалов. В настоящее время имеется несколько математических моделей функциональных свойств полимерных текстильных материалов, основанных на аппроксимации экспериментальных "семейств" релаксации и ползучести различными нормированными функциями [2].

В частности, было показано [3], что, если для математического моделирования вязкоупругих свойств полимерных текстильных материалов относительно простой макроструктуры типа нитей и волокон достаточно использовать в качестве нормированной функции интеграл вероятности (ИВ) или нормированный гиперболический тангенс (ГТ), то для математического моделирования вязкоупругости полимерных текстильных материалов более сложной макроструктуры, к которым следует отнести ткани, пряжу, жгуты, канаты и т.д., целесообразно использовать функцию нормированный арктангенс логарифма приведен-

ного времени (НАЛ). Функция НАЛ является интегральной функцией вероятностного распределения Коши, главным достоинством которого является свойство замкнутости относительно операции сложения случайных величин (то есть сумма случайных величин, распределенных по закону Коши, также распределена по этому закону) [4].

Из этого важного свойства вероятностного закона распределения Коши следует, что вязкоупругие процессы, как составных частей текстильного материала сложной макроструктуры (нитей, волокон), так и самого материала (тканей, пряжи) в целом, могут быть описаны одной математической моделью, в основе которой лежит функция НАЛ, что существенно упрощает процесс математического моделирования вязкоупругости [5].

Учитывая сказанное, математическое моделирование процессов релаксации и ползучести технического текстиля целесообразно проводить на основе нормированной функции НАЛ. Одним из основополагающих достоинств предлагаемой математической модели вязкоупругости является выполнение требования к наименьшему числу параметров-характеристик модели и их физическая обоснованность. К тому же выбранная модель вязкоупругости обладает достаточной простотой, достигаемой за счет учета нелинейности в интегральных ядрах релаксации и запаздывания (времена релаксации и запаздывания вводятся как параметры модели), а не за счет усложнения самого ядра [6].

Следовательно, математическое моделирование вязкоупругости технического текстиля проводилось на основе функции НАЛ, которую можно записать в виде функции релаксации:

$$\varphi_{\text{et}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left( \frac{1}{b_{\text{нэ}}} \ln \frac{t}{\tau_{\text{э}}} \right) \quad (1)$$

для процесса релаксации и в виде функции запаздывания

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{n\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} \right) \quad (2)$$

для процесса ползучести.

С учетом сказанного математические модели релаксации (3) и ползучести (4) имеют вид [7]:

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_{\infty}) \varphi_{\varepsilon t}, \quad (3)$$

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_{\infty} - D_0) \varphi_{\sigma t}. \quad (4)$$

Здесь  $t$  – время;  $1/b_{n\varepsilon}$  – параметр интенсивности процесса релаксации;  $1/b_{n\sigma}$  – параметр интенсивности процесса ползучести;  $\tau_{\varepsilon}$  – время релаксации (время, за которое проходит половина процесса релакса-

$$E_0 = \lim_{t \rightarrow 0} E_{\varepsilon t}, \quad E_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} E_{\varepsilon t}, \quad D_0 = \lim_{t \rightarrow 0} D_{\sigma t}, \quad D_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} D_{\sigma t} \quad (5)$$

– структурные параметры  $b_{n\varepsilon}$  и  $b_{n\sigma}$  характеризуют скорость процессов релаксации и ползучести; указанные параметры соответствуют логарифму приведенного времени "полурелаксации" (половина процесса релаксации при деформации  $\varepsilon$  происходит в интервале времени  $t \in [t', t'']$ , где  $\ln(t'/\tau_{\varepsilon}) = -b_{n\varepsilon}$ ,  $\ln(t''/\tau_{\varepsilon}) = b_{n\varepsilon}$ ) и "полузапаздывания" (половина процесса ползучести при напряжении  $\sigma$  происходит в интервале времени  $t \in [t', t'']$ , где  $\ln(t'/\tau_{\sigma}) = -b_{n\sigma}$ ,  $\ln(t''/\tau_{\sigma}) = b_{n\sigma}$ );

– функции времен релаксации  $f_{\varepsilon, \varepsilon} = \ln(t_1/\tau_{\varepsilon})$  и времен запаздывания  $f_{\sigma, \sigma} = \ln(t_1/\tau_{\sigma})$ , характеризующие сдвиги кривых "семейств" релаксации и ползучести вдоль логарифмическо-временной шкалы содержатся соответственно в структурно-деформационно-временном аргументе-функционале:

ции при величине деформации  $\varepsilon$ );  $\tau_{\sigma}$  – время запаздывания (время, за которое проходит половина процесса ползучести при величине напряжения  $\sigma$ );  $E_{\varepsilon t} = \sigma/\varepsilon$  – модуль релаксации;  $E_0$  – модуль упругости;  $E_{\infty}$  – модуль вязкоупругости;  $D_{\sigma t} = \varepsilon/\sigma$  – податливость;  $D_0$  – начальная податливость;  $D_{\infty}$  – предельная равновесная податливость;  $\varepsilon$  – деформация;  $\sigma = F/S$  – напряжение;  $F$  – усилие при растяжении;  $S$  – площадь поперечного сечения технического текстиля.

Несомненным достоинством математических моделей (1)...(4) является то, что они содержат минимальное число параметров, имеющих четкий физический смысл [8]:  $E_0, E_{\infty}, D_0, D_{\infty}$  – асимптотические значения модуля релаксации и податливости:

$$W_{\varepsilon t} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_{\varepsilon}} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_{\varepsilon}} \right) \right) \quad (6)$$

и в структурно-сило-временном аргументе-функционале:

$$W_{\sigma t} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_{\sigma}} \right) \right). \quad (7)$$

Использование нормированной функции НАЛ в качестве основы математической модели вязкоупругости позволяет с достаточной степенью точности моделировать функциональные свойства технического текстиля. Указанное моделирование расширяет деформационно-временные и сило-временные границы прогнозирования деформационных процессов указанных материалов за счет достаточно медленной сходимости функции НАЛ к своим асимптотическим значениям. Аналитическое за-

дание функции НАЛ и принадлежность ее к классу элементарных функций упрощает дифференциально-интегральные преобразования в рамках рассматриваемой математической модели и облегчает процесс нахождения вязкоупругих характеристик [9].

Разработанные методы математического моделирования функциональных свойств технического текстиля необходимы для получения спектральной оценки этих свойств. Спектральная оценка функциональных свойств текстильных материалов позволяет определить значения среднестатистических времен релаксации, характеризующих релаксационные свойства указанных материалов, и значения среднестатистических времен запаздывания, характеризующих деформационные свойства этих материалов.

Функциональные свойства технического текстиля характеризуются спектром релаксации  $\bar{H}_{\varepsilon t}$  и спектром запаздывания  $\bar{Q}_{\sigma t}$ .

Модуль релаксации связан со спектром релаксации  $\bar{H}_{\varepsilon t}$  через функцию релаксации  $\phi_{\varepsilon t}$  формулой [10]:

$$\int_0^{\infty} \bar{H}_{\varepsilon t} e^{-tx} dx = \frac{d\phi_{\varepsilon t}}{dt} = r_{\varepsilon t}, \quad (8)$$

представляющей собой преобразование Лапласа, в котором спектр релаксации  $\bar{H}_{\varepsilon t}$  играет роль оригинала, а ядро релаксации  $r_{\varepsilon t}$  – роль изображения в терминах операционного исчисления.

Для получения приближений нормированного спектра релаксации можно воспользоваться рекуррентными формулами [11]:

$$\text{при } k=1 \quad \bar{H}_1 = \frac{\partial \phi_{\varepsilon t}}{\partial \ln t} = \phi'_{\varepsilon t} = \bar{r}_{\varepsilon t} \Big|_{t=\tilde{t}}, \quad (9)$$

$$\text{при } k \geq 2 \quad \bar{H}_k = \bar{H}_{k-1} - \frac{1}{k-1} \frac{d\bar{H}_{k-1}}{d \ln \tilde{t}} \Big|_{t=(k-1)\tilde{t}}. \quad (10)$$

Спектр запаздывания  $\bar{Q}_{\sigma t}$  связан с податливостью через функцию запаздывания

$\phi_{\sigma t}$  формулой:

$$\int_0^{\infty} \bar{Q}_{\sigma t} e^{-tx} dx = \frac{d\phi_{\sigma t}}{dt} = r_{\sigma t}, \quad (11)$$

представляющей собой преобразование Лапласа, в котором спектр запаздывания  $\bar{Q}_{\sigma t}$  играет роль оригинала, а ядро запаздывания  $r_{\sigma t}$  – роль изображения в терминах операционного исчисления.

Для получения приближений нормированного спектра запаздывания можно воспользоваться рекуррентными формулами [12]:

$$\text{при } k=1 \quad \bar{Q}_1 = \frac{\partial \phi_{\sigma t}}{\partial \ln t} = \phi'_{\sigma t} = \bar{r}_{\sigma t} \Big|_{t=\tilde{t}}, \quad (12)$$

$$\text{и при } k \geq 2 \quad \bar{Q}_k = \bar{Q}_{k-1} - \frac{1}{k-1} \frac{d\bar{Q}_{k-1}}{d \ln \tilde{t}} \Big|_{t=(k-1)\tilde{t}}. \quad (13)$$

На основе рекуррентных соотношений (9)...(10) и (12)...(13) для приближений спектров релаксации  $\bar{H}_k$  и ползучести  $\bar{Q}_k$  предложено решение задачи об аналитической взаимосвязи между нелинейно-наследственным ядром релаксации и деформационно-временным спектром релаксации, а также между нелинейно-наследственным ядром ползучести и сило-временным спектром ползучести на примере задания функций релаксации и ползучести в виде НАЛ.

Задачи определения спектров релаксации и спектров ползучести свелись к нахождению коэффициентов  $b_{ne}$  и  $b_{n\sigma}$ , зависящих от структуры материала [13].

Следует также заметить, что спектры релаксации  $\bar{H}$  и ползучести  $\bar{Q}$  с достаточной степенью точности характеризуются своими первыми приближениями – релаксационным ядром и ядром ползучести, а последующие приближения быстро сходятся к точным значениям спектров (рис. 1 – приближения спектра релаксации  $\bar{H}_n$  текстильной пряжи ( $b_{ne} = 2,94$ ,  $T=20^\circ\text{C}$ )).

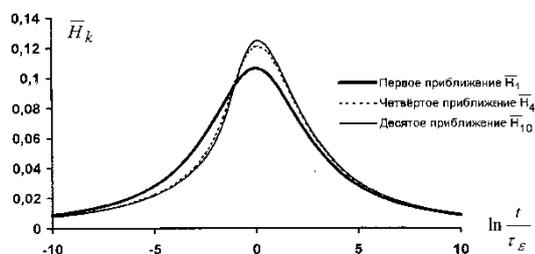


Рис. 1

Достаточно большие реальные значения структурно-чувствительных параметров  $b_{nc}$  и  $b_{ns}$  упрощают решения задач о взаимосвязи деформационно-временного ядра со спектром релаксации и сило-временного ядра со спектром ползучести. В этом случае уже первые приближения можно считать близкими к точным решениям. По мере уменьшения численных значений указанных параметров разница между первыми и вторыми приближениями будет возрастать, но, вероятнее всего, в большинстве реальных случаев уже третьих или, в крайнем случае, пятых приближений будет вполне достаточно [14].

Как показал эксперимент, спектры материалов с простой макроструктурой достаточно точно строятся как с использованием функции НАЛ, так и с использованием функции ИВ. Однако для материалов со сложной макроструктурой предпочтительнее при построении спектров пользоваться функцией НАЛ, имеющей более широкий спектр по сравнению с ИВ. Программное обеспечение по численному расчету спектров релаксации и запаздывания существенно упрощает процесс нахождения необходимых приближений, повышая точность расчета [15].

Все разработанные методики находят свое применение как в научных исследованиях при изучении свойств текстильных материалов, так и в учебных целях: теоретические результаты включены в лекционные курсы, а методики и программное обеспечение – в лабораторные практикумы для студентов и аспирантов. Применение разработанных методик на практике заметно упрощается благодаря автоматизации соответствующих вычислительных процессов посредством программного обеспечения.

Включение методик определения различного рода параметров и характеристик в единые программные пакеты определяет их универсальность и возможность параллельного использования при прогнозировании вязкоупругих состояний текстильных материалов. Создание удобного и наглядного интерфейса позволяет освоить применимость данных методик персоналу с минимальной степенью подготовленности и не требует специальной квалификации.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан и апробирован метод математического моделирования функциональных свойств технического текстиля.
2. Разработан метод спектральной оценки функционально-релаксационных процессов технического текстиля.
3. Разработан метод спектральной оценки функционально-деформационных свойств технического текстиля.
4. Разработаны численные методы расчета спектров релаксации и спектров запаздывания технического текстиля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сталевич А.М., Макаров А.Г. Вариант спектра наследственно-вязкоупругой релаксации синтетических нитей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, № 3. С. 8...13.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Овсянников Д.А., Макаров А.Г., Сталевич А.М., Демидов А.В. Вариант решения задачи по математическому моделированию вязкоупругих процессов полимеров // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2006. Вып. 3. С. 46...54.

6. 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.

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

8. 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.

9. Макаров А.Г., Демидов А.В., Сталевич А.М. Вариант моделирования нелинейно-наследственной вязкоупругости полимерных материалов//Механика твердого тела. – 2009, № 1. С. 155...165.

10. Макаров А.Г., Слуцкер Г.Я., Гофман И.В., Васильева В.В. Начальная стадия релаксации напряжения в ориентированных полимерах//Физика твердого тела. – Т. 58, № 4. С. 814...820.

11. 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.

12. Демидов А.В., Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А. Прогнозирование деформационно-релаксационных процессов полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 1. С. 250...258.

13. Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С., Васильева Е.К. Методы математического моделирования и качественного анализа релаксационно-деформационных процессов арамидных текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 2. С. 251...255.

14. Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С. Спектральный анализ вязкоупругости геотекстильных нетканых полотен и его применение для оценки их функциональности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 2. С. 192...198.

15. Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С. Повышение конкурентоспособности полимерных текстильных материалов на основе применения интегральных критериев достоверности математического моделирования вязкоупругости на стадии их проектирования и организации производства // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 3. С.242...247.

## REFERENCES

1. Stalevich A.M., Makarov A.G. Variant spektra nasledstvenno-vyazkouprugoy relaksatsii sinteticheskikh nitey // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2000, № 3. S. 8...13.

2. Makarov A.G., Stalevich A.M. Prognozirovaniye vosstanovitel'nogo deformatsionnogo protsessa i obratnoy relaksatsii polimernykh materialov // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2002, № 3. S. 10...13.

3. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Metody komp'yuternogo analiza vyazkouprugosti tekhnicheskikh tkaney // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2006, № 3. S. 13...17.

4. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Issledovaniye izmeneniy deformatsionnykh svoystv poliefirnykh nitey v zavisimosti ot stepeni krutki // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2006, № 4. S. 9...13.

5. Ovsyannikov D.A., Makarov A.G., Stalevich A.M., Demidov A.V. Variant resheniya zadachi po matematicheskomu modelirovaniyu vyazkouprugikh protsessov polimerov // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 10. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya. – 2006. Vyp. 3. S.46...54.

6. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Opredeleniye mekhanicheskikh kharakteristik tekstil'nykh materialov pri peremennoy temperature // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2006, № 6. S. 14...19.

7. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Sistemnyy analiz vyazkouprugosti tekstil'nykh materialov // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2007, № 3. S. 20 ...24.

8. Makarov A.G., Demidov A.V., Novoselova A.G., Stalevich A.M. Metody spektral'nogo modelirovaniya mekhanicheskoy relaksatsii tekstil'nykh materialov // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2007, № 1s. S.15...19.

9. Makarov A.G., Demidov A.V., Stalevich A.M. Variant modelirovaniya nelineyno-nasledstvennoy vyazkouprugosti polimernykh materialov//Mekhanika tverdogo tela. – 2009, № 1. S. 155...165.

10. Makarov A.G., Slutsker G.Ya., Gofman I.V., Vasil'eva V.V. Nachal'naya stadiya relaksatsii napryazheniya v orientirovannykh polimerakh//Fizika tverdogo tela. – Т. 58, № 4. С. 814...820.

11. 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 // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2015, № 5. S. 48...58.

12. Demidov A.V., Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A. Prognozirovaniye deformatsionno-relaksatsionnykh protsessov poliamidnykh tkaney,

primenyaemykh dlya izgotovleniya kupolov parashyutov // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2017, № 1. S. 250...258.

13. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S., Vasil'eva E.K. Metody matematicheskogo modelirovaniya i kachestvennogo analiza relaksatsionno-deformatsionnykh protsessov aramidnykh tekstil'nykh materialov // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2018, № 2. S.251...255.

14. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Spektral'nyy analiz vyazkoupругosti geotekstil'nykh netkanykh poloten i ego primeneniye dlya otsenki ikh funktsional'nosti // Izvestiya Vysshikh

Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2019, № 2. S. 192...198.

15. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Povysheniye konkurentosposobnosti polimernykh tekstil'nykh materialov na osnove primeneniya integral'nykh kriteriev dostovernosti matematicheskogo modelirovaniya vyazkoupругosti na stadii ikh proektirovaniya i organizatsii proizvodstva // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2019, № 3. S.242...247.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации. Поступила 17.03.21.

---