

УДК 539.434:677.494

DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_3\_176

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ДЕФОРМАЦИОННО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ТЕХНИЧЕСКОГО ТЕКСТИЛЯ\***

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR COMPUTER FORECASTING  
DEFORMATION AND OPERATIONAL PROCESSES 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

*На основе методов системного анализа вязкоупругости полимерных текстильных материалов разрабатываются компьютерные методы прогнозирования деформационно-эксплуатационных процессов технического текстиля. Выбор основополагающей функции для математического моделирования вязкоупругих процессов технического текстиля производится в соответствии с критерием оптимальности указанного моделирования.*

*Based on the methods of systematic analysis of the viscoelasticity of polymeric textile materials, computer methods are developed for predicting the deformation-operational processes of technical textiles. The choice of the fundamental function for mathematical modeling of viscoelastic processes of technical textiles is made in accordance with the optimality criterion for this simulation.*

**Ключевые слова:** полимеры, технический текстиль, вязкоупругость, деформационно-эксплуатационные процессы, математическое моделирование, релаксация, упругость, вязкоупругость, компьютерное прогнозирование.

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

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

Прогнозирование деформационно-эксплуатационных процессов текстильных материалов обычно проводится на основе численного решения интегральных уравнений Больцмана-Вольтерра [1...3]:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_\theta \cdot \varphi'_{\varepsilon; t-\theta} d\theta \quad (1)$$

– для процесса нелинейно-наследственной релаксации и

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \cdot \int_0^t \sigma_\theta \cdot \varphi'_{\sigma; t-\theta} d\theta \quad (2)$$

– для процесса нелинейно-наследственной ползучести.

При этом в качестве интегральных ядер интегральных уравнений (1), (2) выбирается одна из нормированных функций, целесообразность использования которой определяется на основе критериев оптимальности математического моделирования нелинейно-наследственной релаксации и нелинейно-наследственной ползучести изучаемых материалов [4]. Как было показано, для математического моделирования деформационно-эксплуатационных процессов технического текстиля в качестве основы математической модели наиболее целесообразно использовать нормированную функцию нормированный арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ) [5], [6]:

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{\text{н}\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \quad (3)$$

– для процесса нелинейно-наследственной релаксации и

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{\text{н}\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right) \quad (4)$$

– для процесса нелинейно-наследственной ползучести.

При этом математические модели с функцией НАЛ будут иметь вид [7]:

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \varphi_{\varepsilon t} \quad (5)$$

– для процесса нелинейно-наследственной релаксации и

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0) \varphi_{\sigma t} \quad (6)$$

– для процесса нелинейно-наследственной ползучести.

В уравнениях (1)...(6) введены следующие обозначения:  $t$  – время;  $1/b_{\text{н}\varepsilon}$  – параметр интенсивности процесса релаксации;  $1/b_{\text{н}\sigma}$  – параметр интенсивности процесса ползучести;  $\tau_\varepsilon$  – время релаксации;  $\tau_\sigma$  – время запаздывания;  $E_{\varepsilon t} = \sigma/\varepsilon$  – 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;  $\sigma$  – напряжение;  $a$  – механическая работа деформирования.

Главной особенностью использования функции НАЛ для математического моделирования деформационно-эксплуатационных процессов технического текстиля, в отличие от других аналогичных функций (например, интеграла вероятности (ИВ), функции Кольрауша (ФК) и гиперболического тангенса (ГТ)), состоит в возможности расширения доверительного прогнозирования указанных процессов как в сторону "больших" времен (длительные процессы), так и в сторону "малых" времен (кратковременные процессы), причем в данном случае погрешность прогноза уменьшается за счет снижения влияния квазимгновенного фактора в начале процесса [8].

Если при прогнозировании "средних" по длительности процессов ( $10^{-1}$  мин  $< t < 10^2$  мин) модели с функциями ИВ, ФК, ГТ и НАЛ применительно к синтетическим нитям дают близкие прогнозы, то особая роль функции НАЛ проявляется при прогнозировании "длительных" процессов ( $10^2$  мин  $< t < 10^4$  мин) и "быстротекущих" ( $10^{-2}$  мин  $< t < 10^{-1}$  мин) [9]. Кроме того, применение функции НАЛ предпочтительно при прогнозировании деформационных процессов материалов со сложной структурой ввиду более широких спектров релаксации и ползучести.

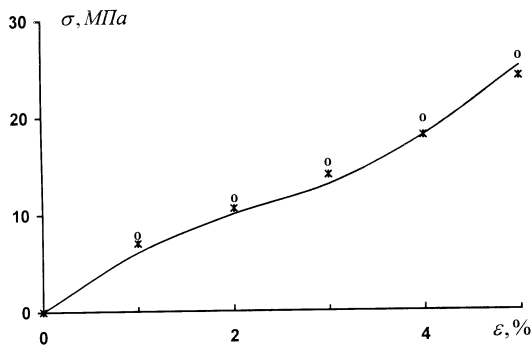


Рис. 1

Для повышения точности прогнозирования деформационно-эксплуатационных процессов технического текстиля были разработаны также методики уточнения расчетных диаграмм растяжения посредством коррекции функции времен релаксации по контрольным точкам экспериментальной диаграммы (рис. 1 – диаграмма растяжения текстильной пряжи,  $T=20^{\circ}\text{C}$  при скорости деформирования  $\dot{\varepsilon} = 0,083\text{c}^{-1}$  (сплошная линия – эксперимент, o – расчет до коррекции, \* – расчет после коррекции диаграммы по точке экспериментальной диаграммы  $\varepsilon = 4\%$ ,  $\sigma = 18,7\text{МПа}$ )) [10...12]. Расчетные диаграммы тем ближе к экспериментальным, чем большее число точек экспериментальной диаграммы выбирается для

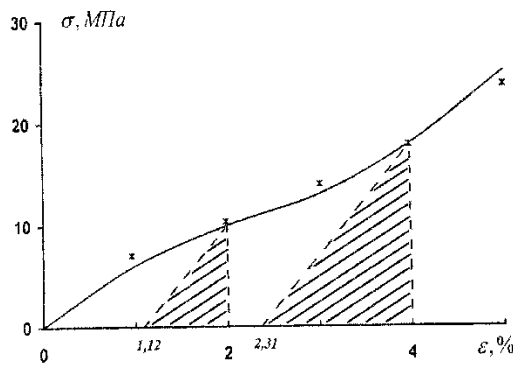


Рис. 2

По аналогии с этим был разработан также метод разделения полной деформации  $\varepsilon_t$  на упругообратимую  $\varepsilon_{to}$  и вязкоупругопластическую  $\varepsilon_{tt}$  компоненты (рис. 2 – разложение полной деформации  $\varepsilon_t$  текстильной пряжи,  $T = 40^{\circ}\text{C}$  по процессу рав-

коррекции [13]. При этом, корректируя расчетную диаграмму, соответствующую некоторой скорости, мы получаем заметное улучшение расчетных диаграмм, построенных для других скоростей. Этот факт говорит об устойчивости данного метода, о методически правильно поставленной задаче и способе ее решения. Предложенный метод коррекции расчетных диаграмм растяжения по точкам экспериментальной диаграммы и его компьютеризация повышают надежность полученных расчетных значений вязкоупругих характеристик [14...16].

Особая роль функции НАЛ видна также при прогнозировании высокоскоростного растяжения, соответствующего "быстротекущему" процессу, где наиболее важной и сложной для прогнозирования является область "малых" времен [17].

С целью наилучшего выявления деформационно-эксплуатационных свойств технического текстиля был разработан метод разделения полной механической работы деформирования  $a_t$  на упругую  $a_{to}$  и вязкоупруго-пластическую (поглощаемую)  $a_{tt}$  компоненты:

$$a_t = a_{to} + a_{tt} \quad (7)$$

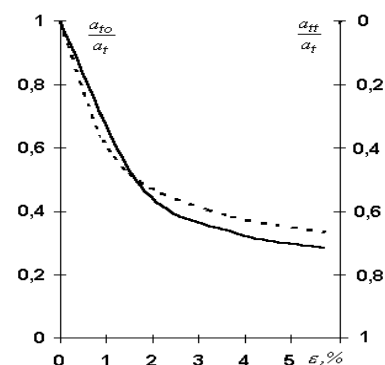


Рис. 3

номерного растяжения со скоростью  $\dot{\varepsilon} = 0,083\text{c}^{-1}$  на упругую  $\varepsilon_{to}$  и вязкоупругопластическую  $\varepsilon_{tt}$  компоненты (\* – расчетные точки диаграммы), рис. 3 – относительные доли упругой  $a_{to}$  и поглощаемой  $a_{tt}$  компонент механической работы де-

формирования  $a_t$  текстильной пряжи,  $T=20^\circ\text{C}$  для скорости деформирования  $\dot{\varepsilon}=0,083\text{c}^{-1}$  (сплошная линия – расчет, пунктир - выделение из экспериментальной диаграммы растяжения) [18]:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{to} + \varepsilon_{tt} \quad (8)$$

Введение поправок на необратимый компонент деформации позволяет условно разделить вязкоупругопластическую компоненту деформации  $\varepsilon_{tt}$  на вязкоупругую  $\varepsilon_{tv}$  и пластическую  $\varepsilon_{tp}$  компоненту, повысить точность, а следовательно, и надежность прогнозирования как простых, так и сложных деформационно-эксплуатационных процессов:

$$\varepsilon_{tt} = \varepsilon_{tv} + \varepsilon_{tp} \quad (9)$$

Таким образом, полная деформация  $\varepsilon_t$  может быть представлена в виде суммы трех компонент деформации:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{to} + \varepsilon_{tv} + \varepsilon_{tp} \quad (10)$$

Степень близости значений упругих компонент механической работы деформирования или соответствующих ей упругих компонент деформации, получаемых по измеряемой и прогнозируемой диаграмме растяжения, служит средством определения надежности прогнозирования деформационно-эксплуатационных свойств технического текстиля [19].

Разработанные методики компьютерного прогнозирования деформационно-эксплуатационных свойств технического текстиля представляют интерес для технологии текстильного производства. Например, этими методиками можно пользоваться при отборе пряжи для вязания трикотажного полотна, так как пряжа должна обладать не только способностью к упругоэластическому восстановлению, но и определенными релаксационными характеристиками, со временем сказывающимися на внешнем виде изделий [20].

1. Методы наследственной механики полимеров, применявшиеся ранее к полимерным нитям, оказались применимыми и для решения задач нелинейно-наследственной вязкоупругости технического текстиля.

2. При исследовании деформационно-эксплуатационных свойств и прогнозировании нагруженных состояний технического текстиля сложной макроструктуры, в отличие от нитей более простого строения, наиболее продуктивной, по сравнению с известными вариантами релаксационных функций и функций ползучести, является функция НАЛ.

3. С учетом специфики сложного строения технического текстиля разработаны аналитические и компьютерные методики исследования их деформационно-эксплуатационных свойств, в том числе:

- методики определения параметров релаксации и ползучести, включая времена релаксации и запаздывания;

- методики прогнозирования деформационно-эксплуатационных процессов, включая деформационно-восстановительные процессы и процессы обратной релаксации;

- методики выделения упругой компоненты механической работы деформирования и упругой компоненты полной деформации технического текстиля.

4. Разработанные методики прогнозирования деформационно-эксплуатационных свойств технического текстиля представляют интерес для технологии текстильного производства, например, при отборе пряжи для вязания трикотажного полотна, так как пряжа должна обладать не только способностью к упругоэластическому восстановлению, но и определенными релаксационными характеристиками, со временем сказывающимися на внешнем виде изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

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.* Прогноз обратной релаксации и деформационно-восстановительных процессов синтетических нитей // Химические волокна. – 2002, № 6. С. 62...64.

8. *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.

9. *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.

10. *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.

11. *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.

12. *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. Сер. 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2006, Вып. 3. С. 46...54.

13. *Макаров А.Г., Слуцкер Г.Я., Жуковский В.А., Терушкина О.Б., Дроботун Н.В., Филипенко Т.С., Едомина Н.А.* Упругие свойства полипропиленовых и поливинилиденфторидных мононитей и сетчатых эндопротезов на их основе // Химические волокна. – 2012, № 5. С. 28...32.

14. *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.

15. *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.

16. *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.

17. *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.

18. *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.

19. *Переборова Н.В., Макаров А.Г., Шванкин А.М., Егорова М.А., Абрамова И.В.* Моделирование и качественный анализ процессов ползучести геотекстильных нетканых материалов...основа повышения их конкурентоспособности // Химические волокна. – 2019, № 5. С. 68...70.

20. *Переборова Н.В., Макаров А.Г., Шванкин А.М., Егорова М.А., Коробовцева А.А.* Прогнозирование ползучести, деформационных и восстановительных процессов геотекстильных нетканых материалов // Химические волокна. – 2019, № 5. С. 71...73.

## REFERENCES

1. Makarov A.G. Kontrol' parametrov nelineynonasledstvennykh yader relaksatsii i zapazdyvaniya sinteticheskikh nitay // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2000, № 2. S. 12...16.

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

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

4. Makarov A.G., Stalovich A.M. Metody utocheniya i kontrolya prognoziруemykh sostoyaniy sinteticheskikh materialov // Khimicheskie volokna. – 2001, №5. S. 58...61.

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

6. Makarov A.G., Stalovich A.M. Variant spektrov relaksatsii i zapazdyvaniya u amorfno-kristallicheskih

синтетических нитей // *Химические волокна*. – 2002, № 3. С. 52...55.

7. Makarov A.G., Stalevich A.M. Prognoz obratnoy relaksatsii i deformatsionno-vosstanovitel'nykh protsessov sinteticheskikh nitey // *Химические волокна*. – 2002, № 6. С. 62...64.

8. Makarov A.G. Opreделение analiticheskoy vzaimosvyazi normirovannykh yader relaksatsii i polzuchesti v lineynoy teorii vyazkoupругosti tekstil'nykh materialov // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2002, № 2. С. 13...17.

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

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

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

12. Ovsyannikov D.A., Makarov A.G., Stalevich A.M., Demidov A.V. Variant resheniya zadachi po matematicheskomu modelirovaniyu vyazkoupругikh protsessov polimerov // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 10. Prikladnaya matematika. Informatika. Protssesy upravleniya*. – 2006, Vyp. 3. С. 46...54.

13. Makarov A.G., Slutsker G.Ya., Zhukovskiy V.A., Terushkina O.B., Drobotun N.V., Filipenko T.S., Edomina N.A. Uprugie svoystva polipropilenovykh i polivinilidenftoridnykh mononitey i setchatykh endoprotezov na ikh osnove // *Химические волокна*. – 2012, № 5. С. 28...32.

14. Golovina V.V., Rymkevich P.P., Makarov A.G., Romanova A.A. Prognozirovanie deformatsionnykh i

relaksatsionnykh protsessov v odnoosnoorientirovannykh polimernykh materialakh // *Химические волокна*. – 2013, № 6. С. 33...40.

15. 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.

16. Demidov A.V., Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A. Prognozirovanie deformatsionno-relaksatsionnykh protsessov poliamidnykh tkaney, primenyaemykh dlya izgotovleniya kupolov parashyutov // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2017. № 1. С. 250...258.

17. Demidov A.V., Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A. Varianty matematicheskogo modelirovaniya i sistemnogo analiza mekhanicheskoy relaksatsii i polzuchesti polimernykh materialov // *Химические волокна*. – 2017, № 4. С. 46...51.

18. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Povyshenie konkurentosposobnosti polimernykh tekstil'nykh materialov na osnove primeneniya integral'nykh kriteriev dostovernosti matematicheskogo modelirovaniya vyazkoupругosti na stadii ikh proektirovaniya i organizatsii proizvodstva // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2019, № 3. С. 242...247.

19. Pereborova N.V., Makarov A.G., Shvankin A.M., Egorova M.A., Abramova I.V. Modelirovanie i kachestvennyy analiz protsessov polzuchesti geotekstil'nykh netkanykh materialov...osnova povysheniya ikh konkurentosposobnosti // *Химические волокна*. – 2019, № 5. С. 68...70.

20. Pereborova N.V., Makarov A.G., Shvankin A.M., Egorova M.A., Korobovtseva A.A. Prognozirovanie polzuchesti, deformatsionnykh i vosstanovitel'nykh protsessov geotekstil'nykh netkanykh materialov // *Химические волокна*. – 2019, № 5. С. 71...73.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации. Поступила 17.03.21.