

УДК 539.434:677.494

DOI 10.47367/0021-3497_2022_5_178

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОСТИ
ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛОГИИ***

**PREDICTION OF THERMOVISCOELASTICITY
POLYMERIC TEXTILE MATERIALS
BASED ON THE THERMO-DEFORMATION-TIME ANALOGY**

Н.В. ПЕРЕБОРОВА

N.V. PEREBOROVA

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: ninal332@yandex.ru

В статье рассматривается прогнозирование деформационных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов в условиях переменной температуры. Сложность указанного прогнозирования заключается в том, что для математического моделирования деформационных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов в условиях переменной температуры нельзя пользоваться традиционными математическими моделями для изотермических процессов. При составлении математической модели деформационных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов в условиях переменной температуры необходимо в традиционную двумерную математическую модель добавить еще одно измерение, существенно усложняющее такое моделирование. Чтобы избежать усложнение математической модели путем добавления дополнительных переменных предложено использовать при моделировании термовязкоупругости полимерных текстильных материалов термодеформационно-временную аналогию, состоятельность которой неочевидна и проверяется лишь экспериментально для каждого материала в отдельности.

The article deals with the prediction of deformation modes of polymeric textile materials operation under variable temperature conditions. The complexity of this prediction lies in the fact that for mathematical modeling of deformation modes of polymeric textile materials operation under variable temperature conditions, it is impossible to use traditional mathematical models for isothermal processes. When

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

compiling a mathematical model of the deformation modes of polymeric textile materials operation under variable temperature conditions, it is necessary to add one more dimension to the traditional two-dimensional mathematical model, which significantly complicates such modeling. In order to avoid complicating the mathematical model by adding optional variables, it is proposed to use a thermostrain-time analogy when modeling the thermoviscoelasticity of polymeric textile materials, the validity of which is not obvious and is only verified experimentally for each material separately.

Ключевые слова: математическое моделирование, прогнозирование, полимерные текстильные материалы, деформационные режимы эксплуатации, переменная температура.

Keywords: mathematical modeling, forecasting, polymeric textile materials, deformation modes of operation, variable temperature.

Вопросами, изучаемыми в статье, занимается научная школа СПбГУПТД, возглавляемая автором д.т.н. Переборовой Н.В. Только в исследованиях представителей этой научной школы математическое моделирование термовязкоупругости полимерных текстильных материалов проводится на основе термдеформационно-временной аналогии. Это уникальный метод. Другие методы моделирования деформационных процессов полимеров не используют этой аналогии. Часто исследователи моделируют деформационные процессы при некотором известном законе изменения температуры. Тем самым подменяя температурные исследования – временными, т.к. изменение температуры в этих случаях жестко привязано к временной переменной. Предлагаемое же исследование лишено этого недостатка.

Суть температурно-временной аналогии при математическом моделировании деформационных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов в условиях переменной температуры состоит в нахождении аналитических зависимостей в виде функций от температуры, посредством которых математические модели деформационных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов для различных, но фиксированных значений температуры являются подобными [2].

Рассмотрим это более подробно.

Введем в рассмотрение для некоторого фиксированного значения температуры

традиционные математические релаксационно-эксплуатационных процессов (релаксация) [3]:

$$E_{\text{ст}} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \phi_{\text{ст}} \quad (1)$$

и деформационно-эксплуатационных процессов (ползучесть) [4]:

$$D_{\text{ст}} = D_0 + (D_\infty - D_0) \phi_{\text{ст}} \quad (2)$$

Здесь приняты следующие обозначения: $E_{\text{ст}}$ – модуль релаксации; t – время; ϵ_t – деформация; E_0 – модуль упругости; E_∞ – модуль вязкоупругости; $D_{\text{ст}}$ – податливость; σ_t – деформация; D_0 – начальная податливость; D_∞ – предельно-равновесная податливость.

В качестве нормированных функций релаксации $\phi_{\text{ст}}$ и ползучести $\phi_{\text{ст}}$, зависящих от логарифма приведенного времени (соответственно, $\ln \frac{t_1}{\tau_\epsilon}$ – для релаксации и $\ln \frac{t_1}{\tau_\sigma}$ – для ползучести, где τ_ϵ – время релаксации; τ_σ – время запаздывания), наиболее часто выбирают одну из следующих функций интеграл вероятности (ИВ), функцию Кольрауша (ФК); гиперболический тангенс (ГТ); нормированный арктангенс логарифма (НАЛ) [5].

Методики построения традиционных математических моделей деформационных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов в условиях постоянной температуры, основанные на деформационно-временной аналогии (для релаксации) и на силовременной аналогии (для ползучести), предполагают возможность сдвига экспериментальных кривых "семейств" релаксации и ползучести, построенных в логарифмической шкале времени, до совмещения с обобщенными кривыми релаксации и ползучести [6].

Величины таких сдвигов определяют функцию времен релаксации $f_{\varepsilon, \varepsilon} = \ln \frac{t_1}{\tau_\varepsilon}$,

называемую также деформационно-временной функцией, и функцию времен запаздывания $f_{\sigma, \sigma} = \ln \frac{t_1}{\tau_\sigma}$, называемую также

силовременной функцией [7].

Таким образом, при выборе конкретной аппроксимирующей функции $\phi_{\varepsilon t}$ или $\phi_{\sigma t}$ задача по прогнозированию деформационных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов в условиях постоянной температуры сводится фактически к определению четырех параметров для процесса релаксации (модуля упругости, модуля вязкоупругости, структурного коэффициента релаксации и деформационно-временной функции) и четырех параметров для процесса ползучести (начальной податливости, предельно-равновесной податливости, структурного коэффициента запаздывания и силовременной функции) [8].

Если "семейства" релаксации (полученные при определенном значении деформации ε_0 , но при разных температурах) или "семейства" ползучести (полученные при определенном значении σ_0 и при различных температурах) удастся посредством сдвигов на величины $f_{T, T} = \ln \frac{t_1}{\tau_T}$ совместить с некоторой обобщенной кривой, то будет иметь место температурно-временная аналогия, а функцию сдвигов в этом случае можно назвать температурно-временной функцией [9].

Таким образом, исследование деформационных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов, протекающих при изменяющейся температуре, но при постоянных значениях деформации или напряжения, сводится, при соответствующем выборе нормированной функции, к определению четырех параметров (двух асимптотических значений температур T_0 и T_∞ , характеризующих температурные границы исследуемого процесса, структурно-температурного коэффициента и температурно-временной функции) [10].

То есть полученные методики позволяют прогнозировать деформационные режимы эксплуатации полимерных текстильных материалов и в условиях изменяющейся температуры [11].

Следует, однако, заметить, что полученные методики предполагают нахождение вышеуказанных четырех параметров для каждого из исследуемых значений температуры, тем самым резко увеличивая число определяемых параметров [12].

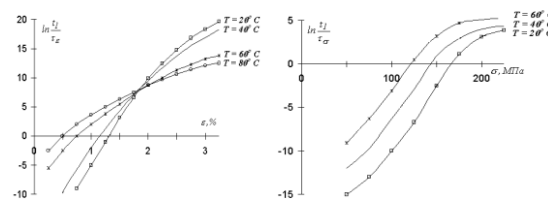


Рис. 1

Рис. 2

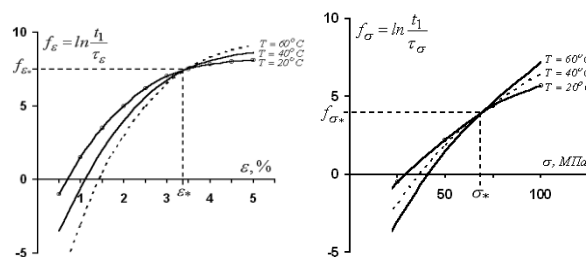


Рис. 3

Рис. 4

Альтернативой этому является проведение исследований деформационных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов при температуре, которая изменяется по заранее определенному сценарию (например, линейная зависимость температуры от времени, соответствующая равномерному нагреванию образца; зави-

симось температуры от времени по заданному закону в ходе остывания и т.п.), что фактически привязывает значения температуры к соответствующим значениям времени, подменяя две переменные (время и температуру) одной [13].

Изучая деформационные режимы эксплуатации полимерных текстильных материалов при различных значения температуры и определяя соответствующим образом деформационно-временные и силовременные функции для различных синтетических нитей (лавсан 114 текс – рис.1 и рис.2; нитрон 33,3 текс – рис. 3 и рис. 4), удалось заметить, что графики приведенных функций при различных значениях температуры могут быть получены поворотом одного из них на некоторый угол, в первом приближении который можно считать линейно зависящим от значения температуры [14].

В этом и состоит основной смысл термомодеформационно-временной аналогии, т.е. наличия некоторого преобразования (в нашем случае – поворота графиков) деформационных кривых, позволяющего от одной кривой переходить к другим.

Этот поворот графиков физически оправдан, так как при изменении температуры соответствующим образом изменяются значения времен релаксации при одинаковых значениях деформации и значения времен запаздывания при одинаковых значениях напряжения и осуществляется либо

вокруг общей точки их пересечения (рис. 1 – точка $\varepsilon_0 \approx 1,8\%$, $f_{\varepsilon_0} = \ln \frac{t_1}{\tau_{\varepsilon_0}} \approx 7,9$),

либо вокруг точки, в которой пересекаются продолжения графиков (рис. 2 – точка $\sigma_0 \approx 282$ МПа, $f_{\sigma_0} = \ln \frac{t_1}{\tau_{\sigma_0}} \approx 4,8$). Указанные

точки пересечения графиков определяются численными методами [15].

Аналитически данный поворот графика можно описать посредством введения новой системы координат (соответственно $(\tilde{\varepsilon}, \tilde{f}_{\varepsilon})$ и $(\tilde{\sigma}, \tilde{f}_{\sigma})$), задаваемой формулами [16]:

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_0 + \tilde{\varepsilon} \cos \alpha - \tilde{f}_{\varepsilon} \sin \alpha, \\ f_{\varepsilon} = f_{\varepsilon_0} + \tilde{\varepsilon} \sin \alpha + \tilde{f}_{\varepsilon} \cos \alpha, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_0 + \tilde{\sigma} \cos \beta - \tilde{f}_{\sigma} \sin \beta, \\ f_{\sigma} = f_{\sigma_0} + \tilde{\sigma} \sin \beta + \tilde{f}_{\sigma} \cos \beta, \end{cases} \quad (4)$$

где α – угол поворота графика деформационно-временной функции, соответствующего температуре T_1 , к графику, соответствующему температуре T_2 ; β – угол поворота графика силовременной функции, соответствующего температуре T_1 к графику, соответствующему температуре T_2 .

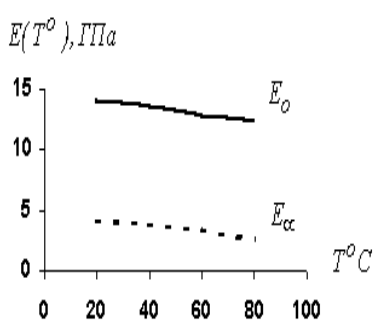


Рис. 5

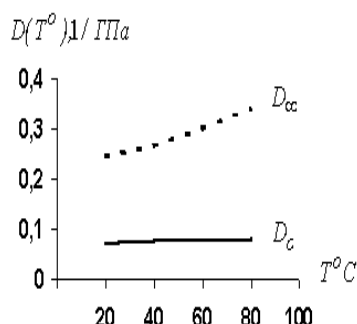


Рис. 6

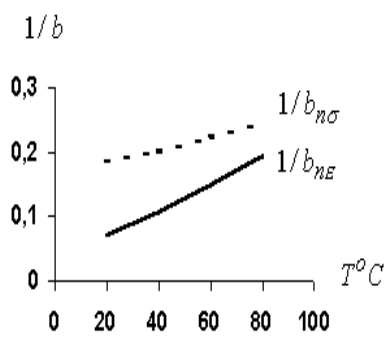


Рис. 7

Аналогично, исследуя характер зависимости остальных параметров от температуры (модуля упругости, модуля вязкоупругости – рис. 5; начальной податливости, предельно-равновесной податливости –

рис. 6; параметров интенсивности процессов релаксации и ползучести – рис. 7; синтетическая нить лавсан 114 текс), можно в первом приближении считать эту зависимость линейной от температуры, что значи-

тельно упрощает процесс прогнозирования [17].

Аналогичные зависимости имеют место для нити нитрон 33,3 текс [18] и для других синтетических нитей [19].

Предложенный метод прогнозирования деформационных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов в условиях переменной температуры, опробованный на вышеперечисленных объектах, дал расчетные результаты, отличающиеся от экспериментальных на величину, не превышающую 20 %, что вполне технически допустимо.

Таким образом, предложенный метод прогнозирования деформационных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов использует минимальное число возможных параметров и не зависит от закона изменения температуры.

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. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Демидов А.В., Макаров А.Г., Вагнер В.И., Егорова М.А. Методы системного анализа функционально-эксплуатационных деформационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения // Химические волокна. – 2020, № 4. С. 28...30.

6. Егорова М.А., Егоров И.М., Переборова Н.В., Макарова А.А. Методы качественной оценки функционально-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов // Химические волокна. – 2020, № 4. С. 68...70.

7. 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.

8. 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.

9. Макаров А.Г., Киселев С.В., Зурахов В.С., Бусыгин К.Н. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование усадочных и восстановительных свойств арамидных текстильных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2020, № 4. С. 119...125.

10. 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.

11. Макаров А.Г., Егоров И.М. Разработка методов системного анализа деформационно-релаксационных процессов полимерных канатов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2020, № 2. С. 71...83.

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

13. Егорова М.А., Егоров И.М. Разработка методов оценки функционально-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов на основе их численного прогнозирования // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2020, № 2. С.110...121.

14. Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант прогнозирования процессов деформирования синтетических нитей // Химические волокна. – 2001, № 4. С.67...69.

15. Макаров А.Г., Сталевич А.М. Методы уточнения и контроля прогнозируемых состояний синтетических материалов // Химические волокна. – 2001, № 5. С. 58...61.

16. Киселев С.В., Вагнер В.И., Бурак Е.А., Козлов А.А. Варианты математического моделирования и компьютерного прогнозирования вязкоупругости полимерных текстильных материалов технического назначения // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2020, № 2. С. 122...132.

17. Макаров А.Г., Киселев С.В., Козлов А.А., Зурахов В.С. Разработка методов математического моделирования и численного прогнозирования релаксационно-деформационных процессов полимерных волокнистых материалов повышенной точности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2020, № 3. С. 19...32.

18. Вавилов Д.С., Головина В.В., Вагнер В.И., Шахова Е.А., Ананичев Е.А., Коробовцева А.А. Опи-

сание термовязкоупругого поведения с учетом взаимодействия фибрилл полимерного текстильного материала на основе механики двухкомпонентной среды // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 1. С. 24...26.

19. *Егорова М.А., Литвинов А.М., Загребина Е.А., Кострюков А.В., Лавриненко П.С.* Численное прогнозирование термовязкоупругих процессов полимерных текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. – 2021, № 1. С.105...114.

REFERENCES

1. *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.

2. *Egorova M.A., Makarova A.A., Konovalov 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.

3. *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.

4. *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.

5. *Demidov A.V., Makarov A.G., Vagner V.I., Egorova M.A.* Methods of system analysis of functional and operational deformation properties of polymeric textile materials for technical purposes // *Chemical fibers.* – 2020, № 4, С. 28...30.

6. *Egorova M.A., Egorov I.M., Pereborova N.V., Makarova A.A.* Methods for qualitative assessment of the functional and operational properties of polymeric textile materials//*Chemical fibers.* – 2020, № 4. P.68...70.

7. *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.

8. *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.

9. *Makarov A.G., Kiselev S.V., Zurakhov V.S., Busygin K.N.* Mathematical modeling and computer prediction of shrinkage and recovery properties of aramid

textile materials// *Design. Materials. Technology.* – 2020, № 4. P. 119...125.

10. *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.

11. *Makarov A.G., Egorov I.M.* Development of methods for system analysis of deformation-relaxation processes of polymer ropes//*Bulletin of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies.* – 2020, № 2. P. 71...83.

12. *Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M.* System analysis of viscoelasticity of textile materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2007, № 3. P. 20 ... 24.

13. *Egorova M.A., Egorov I.M.* Development of methods for evaluating the functional and operational properties of polymeric textile materials based on their numerical prediction // *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technology.* – 2020, № 2. P. 110...121.

14. *Makarov A.G., Stalevich A.M.* A variant of predicting the processes of deformation of synthetic threads//*Chemical fibers.* – 2001, № 4. P. 67...69.

15. *Makarov A.G., Stalevich A.M.* Methods for refining and controlling the predicted states of synthetic materials//*Chemical fibers.* – 2001, № 5. P. 58 ... 61.

16. *Kiselev S.V., Vagner V.I., Buryak E.A., Kozlov A.A.* Variants of mathematical modeling and computer prediction of viscoelasticity of polymeric textile materials for technical purposes // *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technology.* – 2020, № 2. С.122...132.

17. *Makarov A.G., Kiselev S.V., Kozlov A.A., Zurakhov V.S.* Development of methods for mathematical modeling and numerical prediction of relaxation-deformation processes of high-precision polymeric fibrous materials // *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technology.* – 2020, № 3. P. 19...32.

18. *Vavilov D.S., Golovina V.V., Vagner V.I., Shakhova E.A., Ananichev E.A., Korobovtseva A.A.* Description of thermoviscoelastic behavior taking into account the interaction of fibrils of a polymeric textile material based on the mechanics of a two-component medium//*News of higher educational institutions. Light industry technology.* – 2019, № 1. P. 24...26.

19. *Egorova M.A., Litvinov A.M., Zagrebina E.A., Kostyukov A.V., Lavrinenko P.S.* Numerical prediction of thermoviscoelastic processes of polymeric textile materials // *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4. Industrial technologies.* – 2021, № 1. P. 105...114.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации. Поступила 30.09.22.