

# ТЕХНОЛОГИЯ И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И СЫРЬЯ

Научная статья

УДК 677.024:519.876.5

EDN JISFQC

doi 10.34216/2587-6147-2022-4-58-19-24

**Петр Алексеевич Севостьянов**<sup>1</sup>

**Татьяна Алексеевна Самойлова**<sup>2</sup>

**Владимир Иванович Монахов**<sup>3</sup>

**Александр Андреевич Белевитин**<sup>4</sup>

**Илья Максимович Бурдин**<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

<sup>1</sup> petrsev46@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9919-5551>

<sup>2</sup> tasamo89@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2727-0011>

<sup>3</sup> monvi1255@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7016-8680>

<sup>5</sup> sashagoodnes@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2101-1740>

<sup>4</sup> burd20@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0063-6952>

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕЛАКСАЦИИ И СТАРЕНИЯ НЕТКАНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Аннотация.** В статье предложены модель структуры нетканого волокнистого материала как сложной вероятностной конструкции элементов волокон и участков взаимодействия между волокнами и модель взаимодействия упруго-эластических свойств волокон с трением между ними с учетом структуры материала. Предложенный механизм поведения волокон в материале при внешних воздействиях позволил на качественном уровне объяснить сложное поведение материала: обратимые упруго-эластические деформации, пластические деформации, старение и постепенную потерю эксплуатационных преимуществ нетканых волокнистых полотен. Использованы обобщенные энергетические представления о накоплении и расходовании остаточной энергии деформации волокон.

**Ключевые слова:** нетканый волокнистый материал, упругая деформация, эластическая деформация, пластическая деформация, остаточная внутренняя энергия механической деформации, диссипация энергии при необратимых деформациях, динамическая модель

**Для цитирования:** Энергетические аспекты релаксации и старения нетканых волокнистых материалов / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. И. Монахов, А. А. Белевитин, И. М. Бурдин // Технологии и качество. 2022. № 4(58). С. 19–24. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-4-58-19-24>.

Original article

**Petr A. Sevostyanov**<sup>1</sup>, **Tatiana A. SamoiloVA**<sup>2</sup>, **Vladimir I. Monakhov**<sup>3</sup>,

**Alexandr A. Belevitin**<sup>4</sup>, **Ilya M. Burdin**<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Russian State University named after A. N. Kosygin (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia

## ENERGY ASPECTS OF RELAXATION AND AGING OF NONWOVEN FIBROUS MATERIALS

**Abstract.** The article proposes a model of the structure of a nonwoven fibrous material as a complex probabilistic design of fiber elements and areas of interaction between fibers and a mechanism for the interaction of elastic properties of fibers with friction between them, taking into account the structure of the material. The proposed mechanism for the behavior of fibers in a material under external influences made it possible to qualitatively explain the complex behavior of a material: reversible elastic deformations, plastic deforma-

© Севостьянов П. А., Самойлова Т. А., Монахов В. И., Белевитин А. А., Бурдин И. М., 2022

tions, aging, and the gradual loss of operational advantages of non-woven fibrous fabrics. Generalized energy ideas about the accumulation and consumption of the residual energy of fiber deformation are used.

**Keywords:** nonwoven fibrous material, elastic deformation, elastic deformation, plastic deformation, residual internal energy of mechanical deformation, energy dissipation at irreversible deformations, dynamic model

**For citation:** Sevostyanov P. A., Samoilova T. A., Monakhov V. I., Belevitin A. A., Burdin I. M. Energy aspects of relaxation and aging of nonwoven fibrous materials. *Technologies & Quality*. 2022. No 4(58). P. 19–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-4-58-19-24>.

Нетканый материал (НМ) представляет собой конструкцию из случайного сочетания элементов волокон и участков контактов между волокнами. Элементы волокон деформированы в результате удлинения или изгиба. Отметим, что деформации сжатия для волокон вдоль их длины практически исключены. На участках контакта волокна взаимодействуют между собой по поверхностям контакта. Это взаимодействие можно разделить на два вида: сцепление за счет шероховатости, неровности поверхности и так называемое сухое трение поверхностей как результат действия нормальных к поверхности сил, не допускающих потери контакта [1].

Такое представление о «конструкции» НМ следует, например, из рассмотрения фотографий НМ с  $\sim 50$ -кратным увеличением, на которых показаны виды сверху и поперечного сечения слоя НМ (рис. 1 и 2). Волокна в НМ хаотично ориентированы. Длина волокон во много раз превосходит интервалы между участками их контакта друг с другом, в том числе и самих с собой. Объем воздушных промежутков между волокнами значительно (как минимум в разы) превосходит объем, заполненный непосредственно материалом волокон. Несмотря на хаотичность взаимного расположения волокон и многочисленность участков контакта между ними замена волокнистой структуры некоторой усредненной сплошной средой может привести к потере представления об особенностях и природе поведения НМ. Различия в особенностях расположения волокон в плоскости НМ и в его поперечных сечениях наглядно видны при сравнении фотографий на рисунках 1 и 2. Эти различия означают, что в процессе эксплуатации НМ меняет свою структуру по-разному. Меняется не только плотность заполнения пространства волокнами, но и их взаимная ориентация.

Можно представить следующей механизм стабилизации и изменения свойств НМ, исходя из общих энергетических представлений. К моменту создания НМ энергия деформации отдельных элементов в нем не снижается до нуля. Этому мешает взаимодействие волокон на участках контакта. Если силы механических де-

формаций достаточно велики, чтобы изменить участки контактов, то общая конфигурация расположения элементов волокон в НМ может измениться. Такие изменения происходят, пока не возникает некоторое равновесное состояние, при котором новых изменений не происходит. При этом в волокнах НМ сохраняется некоторая остаточная деформация, энергии которой, однако, недостаточно для изменения участков контактов между волокнами.

Следовательно, приходим к выводу, что в образце НМ сохраняется некоторый запас энергии остаточной деформации  $U$ , который ниже порога  $P$ , необходимого для изменения конфигурации элементов волокон в НМ. Представим теперь, что внешние воздействия: механические, тепловые, химические, радиационные – сообщают дополнительную механическую энергию волокнам НМ. Если этой энергии недостаточно для достижения порога  $P$ , то происходит деформация НМ без нарушения его структуры. Происходит диссипация накопленной механической энергии деформации за счет перераспределения энергии между элементами волокон без изменения их взаимной конфигурации.

Если же переданная волокнистой массе НМ энергия внешних воздействий превосходит порог  $P$ , то участки контактов между волокнами, по крайней мере, некоторые из них, нарушаются: изменяются их размеры, расположение, силы взаимодействия между волокнами и др. Изменяется и сам порог  $P$ . Внешне описанные эффекты проявляются в увеличении плотности НМ, частичной потере им упругости, повышении анизотропии его характеристик, потере первоначальной формы и способности хотя бы частично ее восстанавливать после снятия или ослабления внешних воздействий.

С учетом сказанного об особенностях волокнистой структуры НМ выделим в качестве элемента материала часть волокна между двумя областями его контакта с другими волокнами и одну из этих областей контакта. На этот элемент через точки контакта механически воздействуют другие участки этого волокна и соседних волокон. В силу высокой упругости воло-

кон примем, что выделенный участок волокна под действием внешних сил деформируется согласно закону Гука, т. е. деформация пропорциональна нагрузке с коэффициентом пропорциональности  $k$ . В области контакта механическое взаимодействие осуществляется в виде трения по обобщенному закону «сухого» трения Амонтона – Кулона [2]:

$$f = s + \mu N,$$

где  $s$  – сила сцепления, зависящая от шероховатости поверхности контактирующих участков волокон;

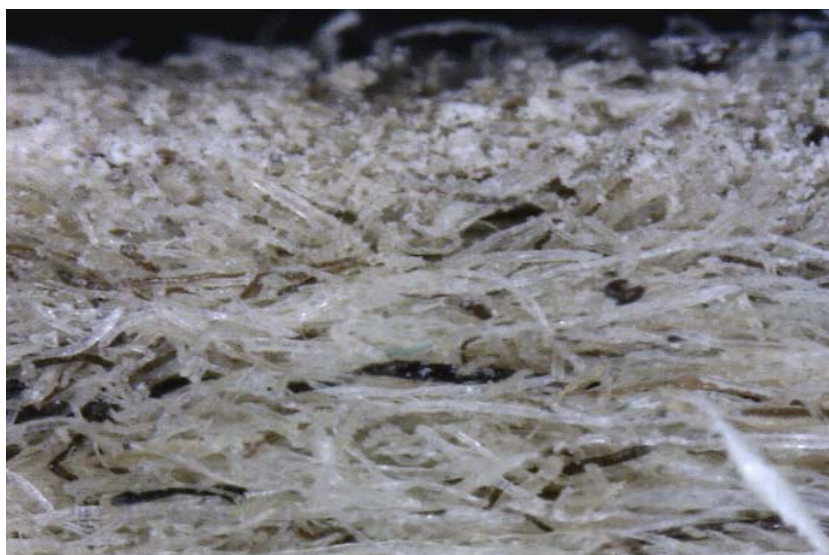
$\mu$  – коэффициент трения;

$N$  – сила нормального давления на поверхность волокна со стороны других волокон в области контакта.

Более точно зависимость силы трения и деформации элемента волокна под действием внешней нагрузки можно описать следующей вербальной моделью. Под действием внешней нагрузки выделенный элемент волокна испытывает упругую деформацию. Суммарное воздействие внешней нагрузки и сил упругой деформации может привести к смещению элемента волокна в области контакта. Смещение оказывается возможным, если эта суммарная сила превысит по абсолютной величине указанную суммарную силу. Если она меньше этой суммарной силы, контакт сохраняется, а действие внешней нагрузки компенсируется силой упругой деформации элемента волокна [3, 4]. Описанный механизм поведения элемента волокна под действием внешней нагрузки воспроизводит следующий алгоритм.



**Рис. 1. Вид волокнистой массы на поверхности полотна НМ (при ~ 50-кратном увеличении)**



**Рис. 2. Вид поперечного сечения слоя НМ после многократных механических сжимающих воздействий (при ~ 50-кратном увеличении)**

Обозначим  $D$  величину изменения координаты  $X$  элемента под действием внешней нагрузки. Это изменение складывается из  $X_{us}$  – величины упругой деформации элемента волокна и  $X_{fs}$  – величины смещения элемента в случае преодоления силы трения. Поэтому  $x$  вычисляется по правилу:

если

$$k \cdot |D| < (s + \mu \cdot N),$$

то  $X_{us} = D$  и  $X_{fs} = 0$ ,  
иначе

$$X_{us} = (s + \mu \cdot N) / k$$

и  $X_{fs} = D - X_{us}$ ,  $X = D$ .

Обратим внимание еще на один аспект поведения элемента волокна: масса элемента ничтожно мала, скорости деформации также весьма низкие. Поэтому силами инерции можно пренебречь и считать, что в любой момент времени элемент находится в состоянии статического (точнее, квазистатического) равновесия и при изменяющейся во времени внешней нагрузке оценку изменений геометрии элемента можно выполнять отдельно для каждого момента времени в соответствии с описанным алгоритмом без учета эффектов инерции [5].

Для описания динамики изменения деформации материала в процессе эксплуатации отметим, что в первом приближении эта деформация складывается из двух составляющих: обратимой упругой и эластической деформации и необратимой пластической деформации. Простейшая динамическая модель с одной степенью свободы, учитывающая эти составляющие, описывается дифференциальным уравнением второго порядка [6]

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} = f(t) - a^2 y(t) - b \frac{dy(t)}{dt}. \quad (1)$$

В уравнении (1) функция времени  $y(t)$  описывает изменение некоторой характеристики НМ, например его плотности на единицу площади ( $\text{г/мм}^2$ ) в некоторой локальной области материала. Функция  $f(t)$  описывает механическое напряжение, возникающее в НМ под действием внешней нагрузки. Член  $a^2 y(t)$  равен силе сопротивления НМ, вызванной упругой составляющей деформации. Член  $b dy(t)/dt$  равен силе сопротивления НМ, вызванной пластической составляющей деформации. Эту составляющую обычно, для упрощения модели, счи-

тают пропорциональной скорости изменения  $y(t)$ . Указанные предположения и допущения для медленных деформаций считаются приемлемыми.

Силы внутреннего трения приводят к диссипации внутренней энергии НМ и необратимости его деформации. Коэффициенты  $a$  и  $b$  отображают величину вклада каждой из составляющих в сопротивление материала внешним нагрузкам.

Параметры  $a$  и  $b$  имеют размерность, обратную времени. Коэффициент  $a$  пропорционален собственной частоте упругих колебаний, которые возникают в материале при отсутствии или малой величине диссипации энергии. Коэффициент  $b$  пропорционален скорости диссипации энергии в материале в единицу времени.

Достаточно реалистичную и близкую к наблюдаемым экспериментальным данным модель получим, если примем, что внешние нагрузки  $f(t)$  на НМ являются переменными во времени величинами. Чтобы наглядно представить влияние переменной нагрузки, периодичности и амплитуды ее воздействия, зададим функцию  $f(t)$  в виде последовательности импульсов. Легко убедиться, что сначала материал частично восстанавливает начальную форму, но со временем способность к восстановлению уменьшается и материал переходит в некоторое остаточное состояние. Фазовый портрет динамики системы отображает диссипацию внутренней энергии материала. Эта энергия на отрезке времени  $[t_1; t_2]$  пропорциональна площади сектора, «ометаемого» радиус-вектором из начала координат между точками фазовой траектории, соответствующими этому отрезку времени. Очевидно, что с течением времени эта энергия уменьшается. Легко показать, что эта энергия убывает по экспоненте  $\sim \exp(-2bt)$ , т. е. параметр  $b$  в уравнении (1) задает скорость диссипации энергии в материале [5, 7].

После переходного процесса НМ периодически меняет свое состояние в соответствии с действием внешней периодической нагрузки. При этом не происходит уменьшения внутренней энергии до нуля. Это объясняется тем, что параметры модели НМ остаются постоянными во времени, а внешняя нагрузка «подпитывает» систему энергией. В реальности любой материал, в том числе и НМ, со временем теряет свои упругие свойства, что приводит к необратимому изменению его формы.

Для учета в модели этого эффекта введем в нее зависимость параметров от времени. Очевидно, что упругость НМ со временем умень-

шается. Смоделируем это уменьшение экспоненциальной функцией

$$a(t) = a_0 \exp(-t/T_a) + a_1.$$

В этой функции вводится новый параметр  $T_a$  – среднее время уменьшения коэффициента упругости до минимального значения. Параметр  $a_1$  задает это остаточное значение коэффициента упругой составляющей деформации. Начальное значение параметра равно  $a_0 + a_1$ .

Другая модификация модели заключается в задании переменного, зависящего от времени параметра  $b$ . Из экспериментальных результатов следует, что величина диссипации энергии в НМ под действием нагрузок постепенно нарастает. Это означает, что параметр  $b$  постепенно увеличивается. Смоделируем это нарастание экспоненциальной функцией

$$b(t) = b_0 (1 - \exp(-t/T_b)).$$

В этой функции вводится параметр  $T_b$  – характерное время увеличения коэффициента диссипации до наибольших значений. В соответствии с этой функцией диссипация внутренней энергии в материале постепенно усиливается от нуля при  $t = 0$  до некоторого предельного значения, которое задается значением параметра  $b_0$ .

После описанной модификации уравнение модели приобретает следующий вид:

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} = f(t) - \left( a_0 \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) + a_1 \right)^2 y(t) - b_0 \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_b}\right) \right) \frac{dy(t)}{dt}. \quad (2)$$

На рисунке 3 показаны графики функций деформации, скорости деформации, импульсов внешней нагрузки на НМ и фазовая траектория изменения состояний НМ во времени. Из рисунка следует, что сначала НМ в большей степени реагирует своей упругой составляющей сопротивления деформации, пытаясь восстановить свою форму после действия нагрузки. Затем начинает нарастать пластическая составляющая. Она увеличивается либо до предела, определяющего разрушение материала в моделируемой локальной области (этот вариант в модели не учтен), либо до достижения некоторого предельного среднего уровня (на приведенных графиках этот предел не достигнут), вокруг которого продолжаются малые упругие колебания за счет сохранившейся в материале остаточной упругой составляющей. Фазовая траектория показывает ту же динамику более наглядно с точки зрения диссипации энергии материала.

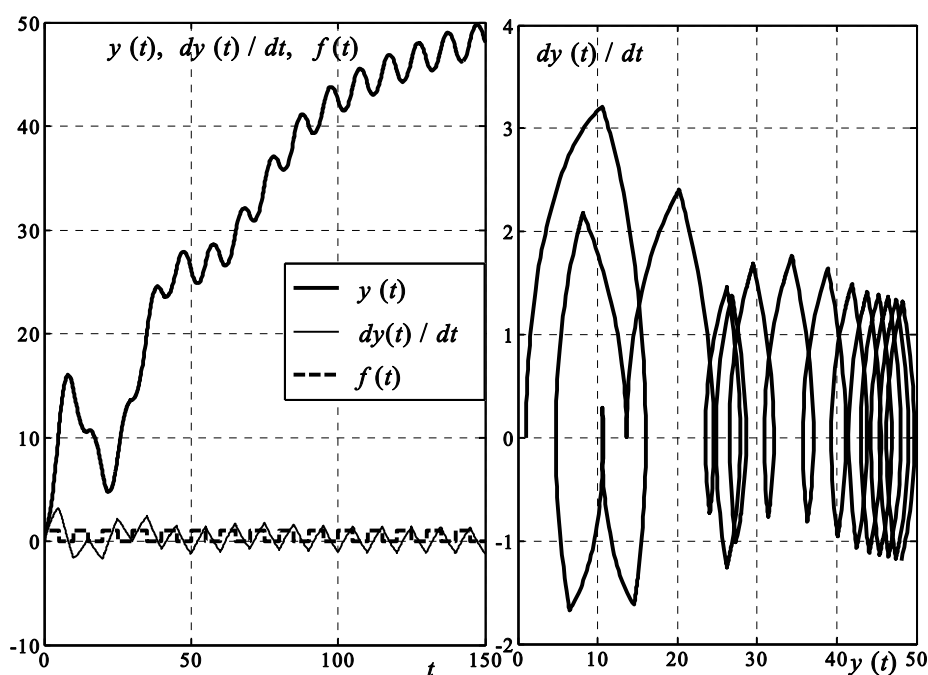


Рис. 3. Реакция НМ на периодическую импульсную нагрузку

## ВЫВОДЫ

1. При формировании НМ структура взаимного расположения и взаимодействия волокон приводит к сохранению в волокнах запаса потенциальной энергии упругой деформации. Многочисленные контакты между волокнами предотвращают диссипацию этой механической энергии и переход ее в тепловую энергию.

2. В результате эксплуатации со временем и под действием внешних механических, радиационных, влаготепловых факторов происходит диссипация остаточной механической

энергии волокон вследствие изменения физико-механических свойств полимерного вещества волокон и контактного взаимодействия между волокнами.

3. Предложена простая нелинейная динамическая модель процесса диссипации остаточной механической энергии в нетканом материале. Модель позволяет оценить влияние упругой, эластической и пластической частей деформации НМ на скорость и особенности динамики деформации материала во времени и диссипации внутренней энергии материала.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Севостьянов А. Г., Элькина Т. Н. Методы исследования неровноты плоских текстильных материалов. М. : Легкая индустрия, 1975. 100 с.
2. Крагельский И. В. Динамическое определение прочности текстильных материалов. М. : Гизлегпром, 1933 ([Серпухов] : тип. треста «Мособлполиграф»). 54 с.
3. Севостьянов П. А. Компьютерные модели в механике волокнистых материалов. М. : Тисо Принт, 2013. 253 с.
4. Sevost'yanov P. A., Seryakova T. V. Study of deformation of nonwoven fibre material during needle-punching // *Fibre Chemistry*. 2009. Vol. 41, no 1. P. 38–40.
5. Севостьянов П. А., Самойлова Т. А. Особенности проявления флуктуационно-диссипационной теоремы в процессах релаксации волокнистых материалов при действии сил сухого и вязкого трения с учетом их статистических особенностей // *Современные технологии хранения, обработки и анализа больших данных : сборник научных трудов кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления*. М. : РГУ им. А. Н. Косыгина, 2021. С. 100–104.
6. Севостьянов П. А. Динамика и модели основных процессов прядения: рыхление, очистка, смешивание, кардо- и гребнечесание, вытягивание, дискретизация, штапелирование, кручение, намотка, перемотка. М. : Клуб печати, 2021. 591 с.
7. Севостьянов П. А., Самойлова Т. А., Тихомирова М. Л. Сухое и вязкое трение, статистические факторы, флуктуационно-диссипационная теорема и особенности их проявления в релаксации волокнистых материалов // *Химические волокна*. 2019. № 6. С. 41–43.

## REFERENCES

1. Sevostyanov A. G., Elkina T. N. Methods for studying the unevenness of flat textile materials. Moscow, Light industry Publ., 1975. 100 p. (In Russ.)
2. Kragelsky I. V. Dynamic determination of the strength of textile materials. Moscow, Gizlegprom Publ., 1933. 54 p. (In Russ.)
3. Sevostyanov P. A. Computer models in the mechanics of fibrous materials. Moscow, Tiso Print Publ., 2013. 253 p. (In Russ.)
4. Sevost'yanov P. A., Seryakova T. V. Study of deformation of nonwoven fibre material during needle-punching. *Fibre Chemistry*. 2009;41,1:38–40.
5. Sevostyanov P. A., Samoilova T. A. Features of the manifestation of the fluctuation-dissipation theorem in the processes of relaxation of fibrous materials under the action of dry and viscous friction forces, taking into account their statistical features. [Modern technologies for storing, processing and analyzing big data: collection of scientific papers Department of Automated Systems for Information Processing and Control]. Moscow, Kosygin St. Univ. of Russia Publ., 2021. P. 100–104. (In Russ.)
6. Sevostyanov P. A. Dynamics and models of the main spinning processes: loosening, cleaning, mixing, carding and combing, drawing, discretization, stapling, twisting, winding, rewinding. Moscow, Club Print Publ., 2021. 591 p. (In Russ.)
7. Sevostyanov P. A., Samoilova T. A., Tikhomirova M. L. Dry and viscous friction, statistical factors, fluctuation-dissipation theorem and features of their manifestation in the relaxation of fibrous materials. *Himicheskie volokna* [Chemical fibers]. 2019;6:41–43. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 26.10.2022

Принята к публикации 23.11.2022