

Научная статья

УДК 677.024:519.876.5

doi 10.34216/2587-6147-2022-1-55-35-39

Петр Алексеевич Севостьянов¹

Галина Георгиевна Сокова²

¹Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

²Костромской государственной университет, г. Кострома, Россия

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

²g_sokova@ksu.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1436-2489>

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТРЕНИЯ ВОЛОКОН В ОДНОМЕРНОМ ВОЛОКНИСТОМ ПРОДУКТЕ

Аннотация. В статье рассмотрена модель пластической деформации одномерных волокнистых продуктов, основанная на представлениях о силах сцепления и сухого трения между волокнами по поверхностям участков касания волокон в продукте. Предложено учесть в этой модели статистическую природу таких факторов, как величина и направление сил нормального давления, величина коэффициента трения, направления поверхностей касания в продукте. В качестве модельного распределения выбрано гамма-распределение. Методом статистического моделирования показано, что учет статистической природы перечисленных факторов приводит к принципиально новой зависимости между скоростью пластической деформации и механическим напряжением сил, возникающих в продукте под действием внешней удлиняющей нагрузки – зависимость подобна действующим для вязких сред с ньютоновским законом вязкого трения.

Ключевые слова: одномерный волокнистый продукт, пластическая деформация, сухое трение, вязкое трение, модель Сен-Венана, статистические вариации, метод статистического моделирования

Для цитирования: Севостьянов П. А., Сокова Г. Г. Статистические особенности трения волокон в одномерном волокнистом продукте // Технологии и качество. 2022. № 1(55). С. 35–39. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-1-55-35-39>.

Original article

Petr A. Sevostyanov¹

Galina G. Sokova²

¹Russian State University named after A. N. Kosygin (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia

²Kostroma State University, Kostroma, Russia

STATISTICAL FEATURES OF FIBRE FRICTION IN A ONE-DIMENSIONAL FIBROUS PRODUCT

Abstract. The article considers a model of plastic deformation for one-dimensional fibrous products based on the ideas of the forces of adhesion and dry friction between the fibres on the surfaces of the areas where the fibres touch in the product. It is proposed to take into account in this model the statistical nature of such factors as the magnitude and direction of the normal pressure forces, the magnitude of the coefficient of friction, the direction of the contact surfaces in the product. The gamma distribution is chosen as the model distribution. The statistical modelling method shows that taking into account the statistical nature of the listed factors leads to a fundamentally new relationship between the rate of plastic deformation and the mechanical stress of forces arising in the product under the action of an external elongating load – the dependence is similar to those acting for viscous materials with Newton's law of viscous friction.

Keywords: one-dimensional fibrous product, plastic deformation, dry friction, viscous friction, Saint Venant model, statistical variations, statistical modeling method

For citation: Sevostyanov P. A., Sokova G. G. Statistical features of fibre friction in a one-dimensional fibrous product. Technologies & Quality. 2022. No 1(55). P. 35–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-1-55-35-39>.

Назовем одномерным волокнистым продуктом (ОВП) изделие из волокон или элементарных нитей, протяженность которого в одном направлении на много порядков больше, чем его размеры в двух других направлениях [1, 2]. К таким продуктам относятся, например: волокнистая лента с чесальных и ленточных машин, ровница, пряжа, крученая пряжа, нити и жгуты химических волокон, нитки.

Все ОВП существуют как единое целое благодаря равновесию сил упругости волокон и сил трения на участках соприкосновения этих волокон в ОВП [1, 3, 4]. Все волокна в ОВП имеют накопленную потенциальную энергию вследствие деформаций при формировании ОВП. Однако уменьшить эту энергию волокна не могут из-за противодействия других волокон, с которыми они взаимодействуют в ОВП. Силы, связанные с деформацией волокна, со временем ослабевают вследствие процессов релаксации. Силы трения остаются актуальными, поскольку всегда препятствуют реальным и виртуальным смещениям участков волокон относительно друг друга [3–5].

Природа и законы трения разных материалов и в разных средах хорошо изучены [1, 3, 5]. Взаимодействие между волокнами по поверхностям их касания моделируют законами сухого трения на основе закона Амонтона – Кулона и его обобщений. Одним из источников пластической деформации ОВП считаются необратимые силы трения между волокнами, возникающие под действием внешней нагрузки [1, 3, 6–8]. Сами волокна деформируются по законам упругой деформации, меняя свою форму и взаимное расположение. Пластическая деформация волокон начинается при гораздо больших значениях механических напряжений, чем те, которые возникают вследствие действия сил сцепления и трения скольжения между волокнами [9, 10]. Относительно друг друга участки волокон смещаются, если внешняя нагрузка такова, что ее действие в пределах участков взаимодействующих поверхностей превосходит максимальную силу трения покоя, которая, в свою очередь, зависит от силы сцепления между поверхностями, силы нормального давления и коэффициента трения.

Согласно модели Сен-Венана пластической деформации с учетом сухого трения взаимосвязь скорости относительной деформации $\varepsilon(t)$ и механического напряжения $\sigma(t)$ в единице объема материала вследствие действия внешней нагрузки выражается формулой

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \begin{cases} 0, & |\sigma(t)| \leq \sigma_{\max}; \\ -\sigma_{\max} \operatorname{sign} \sigma(t). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь σ_{\max} – наибольшее напряжение, при котором касающиеся поверхности еще остаются неподвижными относительно друг друга. Обычно σ_{\max} выражают через нормальную силу n прижатия поверхностей на единицу площади касания и коэффициент трения μ : $\sigma_{\max} = \mu n$.

Как известно [3], после начала скольжения сила трения несколько меньше максимальной силы трения покоя. Сила трения всегда направлена вдоль поверхности касания волокон. На каждом участке это направление может быть различным и варьировать в процессе деформации. Однако интегральный, усредненный по объему ОВП эффект сил трения направлен против внешней деформирующей нагрузки, то есть вдоль ОВП [1, 6, 7, 9, 10].

Перечисленные выше параметры и условия относительного движения участков волокон по поверхностям скольжения можно считать случайными и варьирующими в некоторых пределах [2, 3, 9, 10]. Это направление действия и величина n , коэффициент трения и сила сцепления, причем эти случайные величины, действующие на бесчисленных участках взаимодействия волокон, с высокой степенью точности можно считать независимыми. Их законы распределения не исследованы и не известны, однако их можно заменить модельными распределениями, выбранными исходя из некоторых общих соображений. Поскольку параметры – положительные величины, то в качестве их модельных распределений выберем гамма-распределения.

Для оценки усредненного эффекта используем метод статистического моделирования [2, 6–8], несколько модифицировав формулу (1):

$$v = \begin{cases} 0, & |\sigma| \leq s; \\ -V \operatorname{sign} \sigma. \end{cases} \quad (2)$$

где v – скорость пластической деформации;

s – минимальное механическое напряжение в ОВП, при котором возникает пластическая деформация ОВП. Его величина существенно меньше порога пластической деформации материала волокон;

V – наибольшая скорость деформации.

Поскольку скорость деформации в пределах $|\sigma| > s$ пропорциональна V , то ее среднее значение и коэффициент вариации пропорциональны среднему значению и вариации V . При

этом характер зависимости (1) или (2) не меняется. Следовательно, случайные вариации V не меняют вида зависимости (2) в среднем для всего ОВП.

Значения s моделировались как значения случайной величины, имеющей гамма-распределение с математическим ожиданием $smSr$ и коэффициентом вариации CVs . Для каждого случайного значения s строилась зависимость (2) по 1000 точек – значений σ в диапазоне от $-\max(s)$ до $+\max(s)$, где $\max(s)$ – максимальное из всех смоделированных значений s . По окончании статистического моделирования зависимостей они усреднялись. Значение $smSr = 10$ оставалось одинаковым для всех опытов эксперимента, а коэффициенту вариации CVs задавались значения 0, 30, 70, 100, 125 %.

При изменении коэффициента вариации CVs параметра s (пропорционального максимальной силе трения покоя) характер зависимо-

сти скорости деформации от напряжения меняется принципиальным образом (рис.).

При отсутствии вариаций s ($CVs = 0\%$) зависимость отображает формулу (2) и соответствует модели пластической деформации Сен-Венана вследствие сухого трения. С нарастанием коэффициента вариации зависимость сглаживается, сохраняя, однако, ступенчатую форму. Но при $CVs = 100\%$, что соответствует частному случаю модельного гамма-распределения – экспоненциальному распределению величины s , усредненная зависимость превращается в гладкую, монотонно нарастающую кривую. При этом исчезает и зона нечувствительности, то есть зависимость скорости деформации v от напряжения s приобретает вид, характерный для так называемых вязких сред [4]. Дальнейший рост коэффициента вариации CVs меняет кривизну зависимости: чем больше CVs , тем выше чувствительность скорости деформации к нарастанию напряжения.

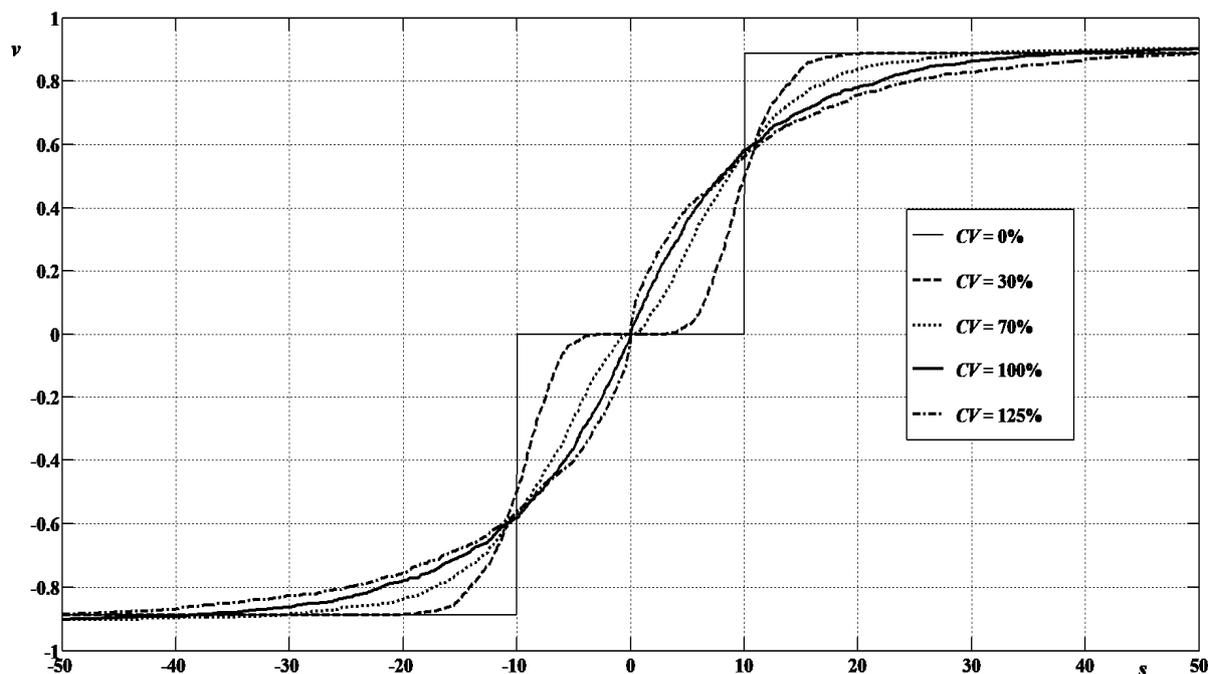


Рис. Зависимость скорости деформации v ОВП от механического напряжения s в материале под действием внешней удлиняющей ОВП нагрузки

Для проверки робастности результата модельный закон гамма-распределения был заменен на нормальное распределение с исключением отрицательных значений случайной величины s и, в другом варианте, на равномерное распределение от нулевого до некоторого наибольшего значения. Компьютерный эксперимент для этих видов альтернативных модельных распределений был повторен при нескольких значениях их параметров.

Эксперимент показал, что, хотя детали зависимости $v(s)$ имеют отличия от этой зависимости при гамма-распределении s , но характер зависимости остается неизменным: статистические вариации параметров приводят к преобразованию закономерности (2) в гладкую монотонно нарастающую кривую, характерную для материалов (сред) с вязким трением.

ВЫВОДЫ

1. Особенности строения, структуры ОВП и физика взаимодействия образующих его волокон на участках соприкасающихся поверхностей посредством сил сцепления и трения делают модель Сен-Венана наиболее адекватной для описания пластической деформации ОВП при его удлинении под действием внешней нагрузки.

2. Статистический разброс величины и направления сил нормального давления, величины коэффициента трения, площади касания и направления силы трения и сцепления огром-

ного множества отдельных участков взаимодействия волокон в ОВП приводят к тому, что усредненная макроскопическая скорость пластической деформации ОВП зависит от внешней нагрузки и создаваемого ею механического напряжения по закону, близкому или совпадающему с законами вязкого трения.

3. Этот результат является фундаментальным и не зависит от деталей взаимодействия и статистических особенностей перечисленных факторов. Он позволяет использовать для моделирования динамики пластической деформации ОВП более простую модель вязкого трения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Основы прядения : в 2 ч. : учебник для вузов текстильной промышленности / В. И. Будников, И. В. Будников, В. Е. Зотиков [и др.]. М. ; Л. : Гос. изд-во лег. пром-сти, 1944–1945 : Ч. 1. 318 с.; Ч. 2. 311 с.
2. Севостьянов П. А. Динамика и модели основных процессов прядения: рыхление, очистка, смешивание, кардо- и гребнечесание, вытягивание, дискретизация, штапелирование, кручение, намотка, перематка : монография. М. : Клуб печати, 2021. 591 с.
3. Крагельский И. В., Щедров В. С. Развитие науки о трении. Сухое трение. М. : Изд-во АН СССР, 1956. 237 с.
4. Бокшицкий М. Н. Длительная прочность полимеров. М. : Химия, 1978. 308 с.
5. Веттегрень В. И., Башкарев А. Я., Суслов М. А. Кинетика трения и износа полимерных композиционных материалов // Физика твердого тела. 2005. Т. 47, вып. 9. С. 1619–1624.
6. Севостьянов П. А. Статистическая имитация растяжения и разрыва пряжи // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1981. № 3. С. 9–13.
7. Севостьянов П. А., Яковлева Ю. С. Статистическая модель деформации волокнистого материала с кулоновским трением // Сборник научных трудов аспирантов. М. : МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2008. С. 73–78.
8. Севостьянов П. А., Радов А. В. Исследование роли ньютоновского трения в некоторых волокнистых продуктах методами статистического компьютерного моделирования // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2008. № 1. С. 92–95.
9. Волков И. А., Коротких Ю. Г., Тарасов И. С. Численное моделирование накопления повреждений при сложном пластическом деформировании // Вычислительная механика сплошных сред. 2009. Т. 2, № 1. С. 5–18.
10. Калентьев Е. А., Тарасов В. В. Численный анализ напряженно-деформированного состояния пряжи каната с линейным касанием при растяжении и кручении // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3, № 4. С. 16–28.

REFERENCES

1. Budnikov V. I., Budnikov I. V., Zotikov V. E. et al. The basics of spinning. In 2 p. Moscow ; Leningrad : St. Publ. House of the light industry, 1944–1945. P. 1. 318 p. P. 2. 311 p. (In Russ.)
2. Sevost'yanov P. A. Dynamics and models of the main spinning processes: loosening, cleaning, mixing, carding and combing, pulling, sampling, stapling, torsion, winding, rewinding. Moscow, Klub Pechati Publ., 2021. 591 p. (In Russ.)
3. Kragel'skij I. V., Shchedrov V. S. Development of the science of friction. Dry friction. Moscow, AN SSSR Publ., 1956. 237 p. (In Russ.)
4. Bokshickij M. N. Long-term strength of polymers. Moscow, Himiya Publ., 1978. 308 p. (In Russ.)
5. Vettergen V. I., Bashkarev A. Ya., Suslov M. A. Kinetics of friction and wear of polymer composite materials. Physics of the Solid State. 2005;47,9:1681–1686. (In Russ.)
6. Sevost'yanov P. A. Statistical simulation of yarn stretching and tearing. Izv. vuzov, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Textile Industry Technology (Series Proceedings of Higher Educational Institutions)]. 1981;3:9–13. (In Russ.)

7. Sevost'yanov P. A., Yakovleva Yu. S. Statistical model of deformation of fibrous material with Coulomb friction. *Sbornik nauchnyh trudov aspirantov* [Collection of scientific papers of graduate students]. Moscow, Kosygin St. Univ. Publ., 2008:73–78. (In Russ.)
8. Radov A. V., Sevostyanov P. A. Research of a newtonian friction role in some fibrous products with methods of statistical simulation. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Textile Industry Technology (Series Proceedings of Higher Educational Institutions)]. 2008;1:98–102. (In Russ.)
9. Volkov I. A., Korotkih Yu. G., Tarasov I. S. Numerical modeling of damage accumulation under complex plastic deformation. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred* [Computational continuum mechanics]. 2009;2,1:5–18. (In Russ.)
10. Kalentev E. A., Tarasov V. V. Numerical analysis of the stress-strain state of a rope strand with linear contact under tension and torsion loading conditions. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred* [Computational continuum mechanics]. 2010;3,4:16–28. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 20.01.2022

Принята к публикации 22.02.2022