

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ  
МЕЖДУ ВОЛОКНАМИ И НИТЯМИ  
В ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ  
С УЧЕТОМ ИХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ**

**COMPUTER SIMULATION OF FRICTION FORCES  
BETWEEN FIBERS AND FILAMENTS  
IN FIBROUS MATERIALS  
INTO ACCOUNT THEIR STATISTICAL FEATURES**

*П.А. СЕВОСТЬЯНОВ, Т.А. САМОЙЛОВА, М.Л. ТИХОМИРОВА*

*P.A. SEVOSTYANOV, T.A. SAMOYLOVA, M.L. TIKHOMIROVA*

**(Российский государственный университет  
имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))**

**(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))**

E-mail: petrsev46@yandex.ru

*В статье рассматривается компьютерная модель сил трения между волокнами и нитями в волокнистых материалах. Применение метода статистического моделирования позволяет изучить влияние трения между волокнами и нитями на динамику развития деформаций и прочностные свойства волокнистых материалов.*

*The article discusses a computer model of friction forces between fibers and filaments in fibrous materials. Using of the method of statistical simulation allows to study influence of friction between fibers and threads on the dynamics of the development of deformations and the strength properties of fibrous materials and recognizes the changing of laws for friction forces with their parameters statistical variations during interaction of fibers.*

**Ключевые слова:** компьютерная модель, моделирование, трение, волокнистый материал, статистические вариации.

**Keywords:** computer model, simulation, friction, fibrous material, statistical variations.

Одним из важнейших факторов, обеспечивающих взаимодействие волокон и нитей в любом волокнистом материале, от клочка волокон хлопка до ткацкого переплетения, являются силы цепкости и силы трения. Первые возникают в результате касания поверхностей. Вторые – в результате силового придавливания одной поверхности к другой. В обоих случаях попытка скольжения одной поверхности по другой вызывает сопротивление. Если силы, которые могут

вызвать скольжение, недостаточны, то скольжения не происходит, и поверхности остаются неподвижными относительно друг друга. Если же смещающие силы достаточно велики, то происходит скольжение поверхностей друг по другу. Представим, что сцепление и трение между волокнами или нитями полностью отсутствуют. Очевидно, что в этом случае механические свойства и характеристики волокнистого материала будут принципиально отличаться

от свойств и характеристик реального материала, если этот материал вообще сохранит свое существование как таковой.

Вопросам о роли трения в волокнистых материалах всегда уделялось внимание исследователей: упомянем здесь лишь работы основателя отечественной науки о трении и трибологии И.В. Крагельского [1] и А.Ф. Капитанова [2]. При описании сил трения между волокнами обычно используют модель Амонтона - Кулона, по которой силы сцепления, приходящиеся на единицу площади касающихся поверхностей, пропорциональны этой площади с постоянным для материалов данной пары волокон коэффициентом цепкости  $q$  в широких пределах условий контакта. Силы трения пропорциональны силе нормального давления  $N$ , которая прижимает поверхности волокон друг к другу с коэффициентом трения  $\mu$ . Пока внешние силы, действующие вдоль поверхности скольжения, не превышают этой силы трения, скольжения не происходит. Если же внешние силы превосходят силы трения, то начинается скольжение поверх-

ностей волокон друг по другу. В качестве таких внешних сил, вызывающих смещение  $x(t)$ , могут быть силы  $S(t)$ , приложенные к волокнам извне, и силы упругости  $F_u(t)$  самих волокон, вызванные их деформацией. С учетом сказанного можно записать второй закон Ньютона для движения элемента волокна, касающегося другого волокна, в виде:

$$\frac{dp(t)}{dt} \sim S(t) + F_u(t) + F_{tr}(t); p(t) \sim \frac{dx(t)}{dt}. \quad (1)$$

Силы упругости волокон при малых относительных деформациях и на коротких отрезках времени можно считать пропорциональными деформации, проявляющейся в относительном смещении волокон, с коэффициентом упругости  $k$ :  $F_u(t) = -kx(t)$ . Для сил сцепления и трения связь со смещением волокон и скоростью их смещения зададим следующим логически - алгебраическим соотношением, отображающим описанное выше условие возникновения относительного смещения волокон:

$$F_{tr}(t) = \begin{cases} -(S(t) - kx(t)), & \text{если } |S(t) - kx(t)| < q + \mu N, \\ -(q + \mu N) \cdot \text{sign}(p(t)), & \text{если } |S(t) - kx(t)| \geq q + \mu N. \end{cases} \quad (2)$$

Результаты интегрирования уравнений (1), (2) можно найти во многих работах. Особенность участия сил "сухого" трения (2) в динамике заключается в негладких фазовых траекториях движения, в неоднозначности предельных стационарных точек или траекторий в фазовом пространстве [3...5].

Однако для волокон и нитей, образующих текстильные волокнистые материалы, в уравнениях (1), (2) оказывают существенное и принципиально важное влияние дополнительные факторы, специфичные для этих механических систем. Это количество участков контакта между волокнами и условия контакта: площадь, направление действующих сил, состояние поверхностей, которые варьируют в широких пределах и случайным образом.

Поэтому для получения адекватной картины влияния трения между волокнами на интегральные эффекты в механике воло-

книстых материалов необходимо учитывать перечисленные факторы вероятностной природы. С этой целью решение уравнений (1), (2) было выполнено для многих вариантов начальных условий и параметров, которые задавались как значения случайных величин, то есть использовался метод статистического моделирования. Получаемые таким образом фазовые траектории усреднялись по большому числу реализаций  $N_{\text{повт}}$ , которое выбиралось моделирующей программой автоматически до достижения заданной точности усреднения.

В экспериментах с моделью варьировались как отдельные факторы, так и группы факторов (проводились однофакторные и многофакторные эксперименты). Варьировались начальное смещение  $x(t=0)$  (для дифференциальных уравнений (1)), коэффициенты упругости  $k$ , цепкости  $q$ , трения  $\mu$ , сила нормального давления  $N$ , парамет-

ры внешней силы, которая задавалась в виде суммы постоянной составляющей  $S_0$  и синусоиды с амплитудой  $S_a$ :

$$S(t) = S_0 + S_a \sin(\omega t).$$

Значения всех варьируемых параметров генерировались как случайные величины с нормальным законом распределения. Такой выбор закона распределения основан на центральной предельной теореме, которая должна "работать" в условиях массовости рассматриваемых взаимодействий между волокнами, независимости этих взаимодействий и однородности в рамках большого числа участков взаимодействия. При этом исследовалось также и влияние величины коэффициентов вариации этих случайных величин, которые в экспериментах изменяли от нуля до 30%.

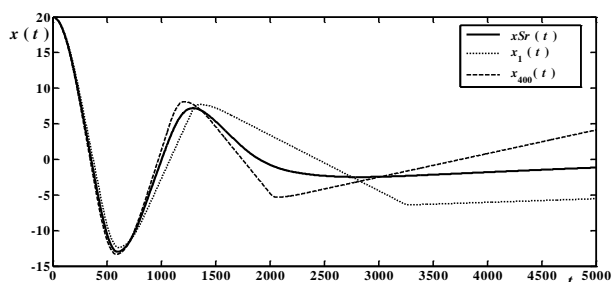


Рис. 1

## ВЫВОДЫ

Анализ результатов однофакторных и многофакторных экспериментов показал, что статистические вариации параметров, определяющих законы трения между волокнами и нитями, приводят к сглаживанию кривых, описывающих динамику исследуемой системы. В результате эффекта сглаживания влияние эффектов "сухого" трения оказывается эквивалентно действию так называемого "вязкого" трения, когда сила трения пропорциональна усредненной скорости перемещения касающихся поверхностей. Этот результат существенно упрощает учет влияния трения между волокнами и нитями в волокнистом материале на динамику развития деформаций и прочностные свойства этих материалов.

На рис. 1 (усредненная траектория  $xSr(t)$  и 1-я и 400-я реализации траекторий) в качестве примера приведены усредненная по  $N_{povt} = 500$  реализациям кривая релаксации координаты смещения точки контакта  $x(t)$  и две отдельные реализации для релаксации, полученные при следующих исходных условиях однофакторного эксперимента:  $S_0 = 0$ ,  $S_a = 0$ ,  $x(0) = \text{const}$ ,  $k = \text{const}$ ,  $q = \text{const}$ ,  $\mu = \text{const}$ ,  $N \sim \text{Norm}(N_{sr}, CV=20\%)$ , то есть случайному варьированию подвергалась только сила нормального давления, прижимающая трущиеся поверхности волокон друг к другу. На рис. 2 (усредненный импульс  $pSr(t)$  и 1-я и 400-я реализации импульса) показаны аналогичные кривые для усредненного импульса  $pSr$  и для двух отдельных реализаций.

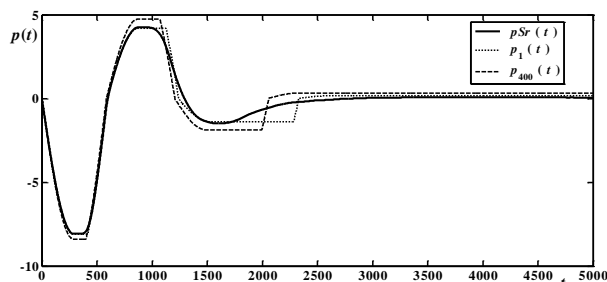


Рис. 2

Получение закона вязкого трения как результат статистического усреднения действия закона "сухого" трения в условиях статистических вариаций параметров отличается от молекулярной трактовки природы вязкого трения в вязких жидких и пластичных средах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И.В. Физические свойства лубяного сырья. – 2-е изд. – М.: Гизлегпром, 1939.
2. Капитанов А.Ф. Фрикционные процессы в прядении. – В 2-х ч. – М.: МГТУ, 2005.
3. Севостьянов П.А. Компьютерные модели в механике волокнистых материалов. – М.: Тисо Принт, 2013.
4. Севостьянов П.А. Статистическая имитация растяжения и разрыва пряжи // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1981, №3. С.9...14.

5. Севостьянов П.А. Влияние числа обвивочных волокон на прочностные свойства пряжи пневмомеханического способа прядения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1983, №5.

#### REFERENCES

1. Kragel'skiy I.V. Fizicheskie svoystva lubyanogo syr'ya. – 2-e izd. – М.: Gizlegprom, 1939.

2. Kapitanov A.F. Friksionnye protsessy v pryadenii. – V 2-kh ch. – М.: MGTU, 2005.

3. Sevost'yanov P.A. Komp'yuternye modeli v mekhanike voloknistykh materialov. – М.: Tiso Print, 2013.

4. Sevost'yanov P.A. Statisticheskaya imitatsiya rastyazheniya i razryva pryazhi // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 1981, №3. S.9...14.

5. Sevost'yanov P.A. Vliyanie chisla obvivochnykh volokon na prochnostnye svoystva pryazhi pnevмомеханического способа прядения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1983, №5.

Рекомендована кафедрой автоматизированных систем обработки информации и управления. Поступила 01.09.19.

---