

УДК 620.16

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**THE DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY
FOR INDIRECT ESTIMATION OF TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS
OF TEXTILE MATERIALS**

А.Ю. МАТРОХИН, П.В. КОРОЛЁВ
A.YU. MATROKHIN, P.V. KOROLYOV

**(Ивановский государственный политехнический университет,
Ивановский государственный энергетический университет)**
**(Ivanovo State Polytechnical University,
Ivanovo State Power University)**
E-mail: vedunkp@rambler.ru

В статье представлена методика оценки энергетического состояния трибологической системы, включающей волокнистые компоненты, с помощью которой возможно прогнозирование основных физико-механических параметров текстильных материалов при трении. В решении обозначен-

ной задачи использованы элементы энергетического подхода к процессу трения. Также представлены результаты трибологических испытаний различных волокнистых материалов в сравнении с традиционным подходом.

The article presents a methodology for assessing the energy state of a tribological system, including the fibrous components with which it is possible to predict the main physical-mechanical parameters of textile materials by friction. In solving the problem we use the elements an energy approach to the process of friction. Also presents the results of tribological tests of various fibrous materials in comparison with the traditional approach.

Ключевые слова: текстильные материалы, трение, энергия активации, математическая модель, методика оценки.

Keywords: textile materials, friction, activation energy, mathematical model, estimation technique.

Одним из объективных показателей оценки основных физико-механических параметров трибологической системы, исследуемой посредством композитной пары трения, является внутренняя энергия данной системы. Внутренняя энергия трибосистемы зависит от многих факторов, среди которых можно выделить коэффициент трения и состав материала трущихся поверхностей [1].

В качестве базовых параметров моделируемой трибосистемы выбран тип пары трения (сталь – сталь), схема трения (диск – диск) и наличие смазочной среды (смесь минерального масла И20-А с волокнистым наполнителем). Трущиеся поверхности предполагаются идеально гладкими, то есть шероховатостью поверхностей трения пренебрегаем. При моделировании решалась задача по оценке внутренней энергии E трибосистемы в процессе трения в зависимости от вида волокнистого материала, введенного в состав смазочного слоя.

Процесс трения поверхностей по схеме диск – диск (рис. 1) на молекулярном уровне представляется как осесимметричное движение параллельных поверхностей трения в присутствии между ними упомянутой смазочной среды.

Молекулы наполнителя в пограничном смазочном слое могут иметь различную форму (эллипсоидную, циклическую, линейную, разветвленную, пространствен-

ную и т.д.) и занимать различные энергетические уровни, тем самым определяя адсорбционные свойства смазочного материала (СМ) [2].

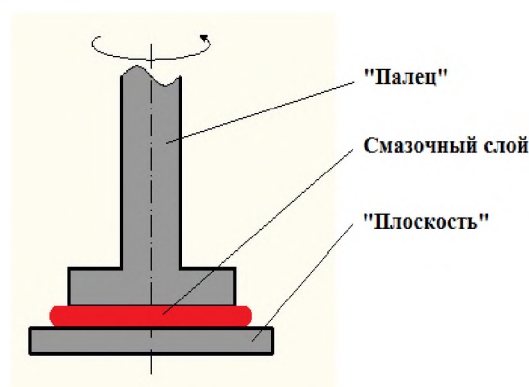


Рис. 1

Для рассматриваемой схемы трения примем рабочую гипотезу о соответствии ее характеристик стационарному процессу течения, который описывается известным уравнением Навье-Стокса [3]:

$$\eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = 0, \quad (1)$$

где η – динамическая вязкость СМ, Па·с; v – скорость течения СМ, м/с.

В случае учета одной пространственной переменной и с учетом начальных и граничных условий формула примет вид:

$$\begin{cases} \eta \frac{d^2 v}{dz^2} = 0, \\ z = z_0 : v = 0, \\ z = h^* - z_0 : v = u. \end{cases} \quad (2)$$

где z_0 – толщина адсорбированного на поверхностях трения слоя молекул СМ, мкм; u – относительная скорость стационарного течения, определяемая как ωR ; h^* – толщина зазора между поверхностями, мкм.

С учетом того, что

$$\begin{cases} 0 = cz_0 + d, \\ u = c(h^* - z_0) + d, \end{cases} \quad (3)$$

$$v(z) = \frac{u}{h^* - 2z_0} z - \frac{uz_0}{h^* - 2z_0} = \frac{u}{h^* - 2z_0} (z - z_0). \quad (5)$$

Поскольку толщина пристенного слоя много меньше расстояния между пластинами ($z_0 \ll h^*$), выражение (5) примет вид:

$$v(z) = \frac{u}{h^*} (z - z_0). \quad (6)$$

При создании модели нами применена универсальная машина трения МТУ-01 с целью сопоставления теоретически прогнозируемых значений коэффициента трения с экспериментальными значениями.

Раскроем сущность методики расчета коэффициента трения, получаемого на используемой машине. Как известно из механики, дифференциал момента трения $dM_{тр}$ при вращении элементов пары трения определяется как произведение радиуса тела R вращения к приложенному дифференциалу силы dF :

$$dM_{тр} = R dF(R). \quad (7)$$

В зависимости от формы пары трения дифференциал силы будет варьироваться, так как

$$dF(R) = \mu p dS, \quad (8)$$

выражение коэффициентов будет иметь вид:

$$\begin{cases} c = \frac{u}{h^* - 2z_0}, \\ d = \frac{uz_0}{2z_0 - h^*}. \end{cases} \quad (4)$$

В результате математических преобразований получим выражение для определения скорости движения смазочного материала на любой высоте от нижней пластины пары трения:

где p – давление в пятне контакта, Па; μ – коэффициент трения; dS – площадь трения, m^2 .

В данной машине верхняя поверхность вращается относительно неподвижной нижней поверхности со скоростью v , зависящей от рассматриваемой высоты. Нормальное гидродинамическое давление p , возникающее в пограничном смазочном слое высотой h^* , будет равно:

$$p = \frac{\eta v(z)}{h^*}. \quad (9)$$

В соответствии с теорией И.Я. Френкеля [4] динамическая молекулярная вязкость характеризуется такими молекулярными параметрами, как: r_m – радиус молекулы; τ_0 – период колебания частицы; ℓ – межчастичное расстояние:

$$\eta = \frac{kT\tau_0}{\pi r_m \ell^2} e^{\frac{E}{kT}}. \quad (10)$$

Поскольку в эксперименте нами используется дисковая поверхность, то для нахождения ее площади воспользуемся формулой $S^* = \pi R^2$. Для нахождения силы нам необходимо найти дифференциал площади полукруга:

$$dS = \frac{\pi R dR}{2}. \quad (11)$$

Подставляя полученный результат в выражение для дифференциала силы, имеем:

$$dF(R) = \frac{\mu \pi R dR}{2}. \quad (12)$$

Тогда искомым момент трения с учетом формул (10), (12) примет вид:

$$M_{\text{тр}} = \frac{\pi \mu \omega R^4}{2(h^*)^2} (z - z_0) \frac{kT \tau_0}{\pi r_m \ell^2} e^{\frac{E}{kT}}. \quad (13)$$

В то же время по второму закону динамики вращательного движения изменение момента импульса вращающегося тела равно произведению момента силы, действующего на тело, на время действия этого момента:

$$M_{\text{тр}} \Delta t = J \omega_2 - J \omega_1, \quad (14)$$

где J – момент инерции диска; ω_1 и ω_2 – начальная и конечная угловые скорости. Так как $\omega_1 = 0$ и $\Delta t = t$, то $M_{\text{тр}} \Delta t = J \omega_2 = J \omega$, откуда

$$M_{\text{тр}} = \frac{J \omega}{t}. \quad (15)$$

Момент инерции диска относительно его геометрической оси равен $J = mR^2/2$. Подставив это выражение в формулу (15), найдем:

$$M_{\text{тр}} = \frac{mR^2 \omega}{2t}. \quad (16)$$

Представив массу диска в виде произведения плотности на объем и учитывая, что $V_{\text{диска}} = \pi R^2 h$, получим окончательное выражение для момента трения с точки зрения теоретической механики:

$$M_{\text{тр}} = \frac{\pi \rho R^4 h \omega}{2t}, \quad (17)$$

где время t фиксировано для каждого эксперимента.

Приравняв обе правые части выражений (13) и (17) для момента трения, получим:

$$\frac{\pi \mu R^4}{(h^*)^2} (z - z_0) \frac{kT \tau_0}{\pi r_m \ell^2} e^{\frac{E}{kT}} = \frac{\pi \rho R^4 h \omega}{t}. \quad (18)$$

Получим из последней формулы интересующее нас выражение для энергии активации:

$$E = kT \ln \left[\frac{\pi \rho R (h^*)^2 r_m \ell^2}{\mu k T \tau_0 t (z - z_0)} \right]. \quad (19)$$

Эволюция (изменение) этой энергии складывается из многих параметров. Одними из самых важных являются: энергия теплового движения молекул kT , коэффициент трения μ , показывающий влияние рода веществ, из которых состоят пары трения и молекулярные параметры СМ:

$$E = kT \ln \varepsilon \gamma, \quad (20)$$

где γ – безразмерный параметр, характеризующий воздействие на систему макро- и микрофакторов, таких как: структура пар трения, структурные особенности СМ, внешние условия (нагрузка, скорость вращения):

$$\gamma = \frac{\pi \rho R (h^*)^2 r_m \ell^2}{\mu k T \tau_0 t (z - z_0)}. \quad (21)$$

Здесь ε – поправочный коэффициент, отражающий зависимость геометрии поверхности трения (для схемы трения диск – диск $\varepsilon = 2$).

Проведем численный анализ эволюции энергии системы при трении. Выше нами получена формула (18) для оценки энергии при изменении внутренних параметров трибосистемы. Полная энергия трибосистемы включает в себя энергию внешнего воздействия на смазочный материал и внутренней энергии смазочного материала. Следует отметить, что полученное изменение

эволюции энергии трибосистемы, полученной в ходе математического моделирования, с учетом полученных экспериментальных результатов коррелирует с изменением энергии, полученной методом молекулярного моделирования. Подставим необходимые исходные данные для расчета энергии

$$E = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot \ln \varepsilon_i \frac{3,14 \cdot 7826 \cdot 0,025 \cdot (10^{-5})^2 \cdot 5 \cdot 10^{-10} \cdot (10^{-10})^2}{0,1 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot (10^{-9} - 10^{-10})} = 2,1 \text{ эВ}.$$

Таким образом, нами получены числовые значения для эволюции энергии трибосистемы. Они отражают зависимость энергии системы от геометрии пары трения.

Следующим этапом исследования явилось экспериментальное определение триботехнических характеристик волокнистых материалов. Нами проводились совместные измерения и исследования по изучению моделей трения и прогнозирования триботехнических свойств с использованием достижений молекулярного моделирования и текстильного материаловедения.

Первую серию экспериментов проводили с использованием УМТ-01. Факторами, существенно влияющими на измеряемую силу и коэффициент трения, являются: контактное давление (нагрузка), скорость скольжения, температура в зоне контакта, наличие и тип смазочного материала [5], [6]. Скорость скольжения зафиксирована на уровне 0,26 м/с, температура в зоне контакта – $300 \pm 5^\circ\text{K}$ (во избежание перегрева образцов длительность испытаний составляла не более 5 мин). В качестве переменных факторов выступили контактное давление и тип смазочного материала. Исследования проведены для четырех образцов бикомпонентных смазочных материалов, гомогенизированных до заданного размера элементарной фракции. Измельченные образцы полимерного материала, используемого в изготовлении текстильных нитей, смешивались с минеральным смазочным материалом И-20А в массовых долях 1:10. Подготовленные таким образом образцы сохраняют большое влияние волокнистой составляющей на триботехниче-

системы, а именно: постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; абсолютная температура $T = 300^\circ\text{K}$; плотность стали (марка 45) $\rho = 7826$ кг/м³; радиус R пары трения 0,025 м; толщина смазочного слоя h^* , 10^{-5} м; время до остановки t 1с.

Тогда получим:

ские характеристики смеси при нивелировании значения температурной составляющей в результатах эксперимента. Образец 1 – комплексная полиарамидная нить 1000 текс (русар), образец 2 – комплексная полиарамидная нить 40 текс (twaron), образец 3 – комплексная полиэтилентерефталатная нить 2 ктекс (лавсан), а образец 4 – комплексная полиарамидная нить 58,8 текс (русар).

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости расчетного коэффициента трения от нормальной нагрузки для исследуемых материалов.

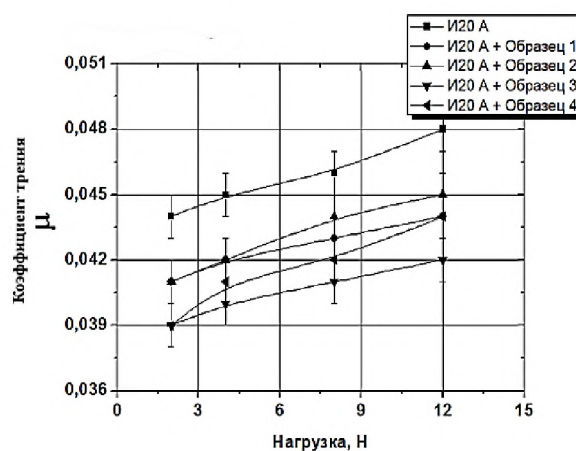


Рис. 2

Исследуемые образцы бикомпонентных смазочных материалов по отношению к базовой основе (минеральному маслу И-20А) ведут себя качественно подобно, снижая величину коэффициента трения. При этом сохраняется пропорциональный закон изменения коэффициента трения в зависимости от нагрузки.

Вторую серию экспериментов проводили в отношении тех же волокнистых материалов с целью определения динамического коэффициента трения с использованием известной методики наклонной плоскости [7]. Для минимизации влияния геометрии нити на результаты эксперимента трение проводилось вдоль волокон. Трещи-

еся поверхности организованы путем плотного расположения нитей параллельно друг другу. Аналогично была подготовлена поверхность бруса. Результаты эксперимента представлены в табл. 1 (значения коэффициентов трения по результатам испытаний на наклонной плоскости).

Таблица 1

№	Образец комплексной нити	Значение динамического коэффициента трения
1	Полиарамидная нить 58,8 текс (русар)	0,464
2	Полиарамидная нить 40 текс (twaron)	0,727
3	Полиэтилентерефталатная нить 2 ктекс (лавсан)	0,577

В ходе испытаний на наклонной плоскости выяснилось, что линейная плотность и морфология нити оказывают сильное влияние на результаты испытаний, не сопоставимое с влиянием материала. Поэтому результаты испытаний нити русар 1000 текс в итоговой зависимости не учитывались.

Итоговая зависимость коэффициентов трения материалов, приведенных к традиционной методике (наклонной плоскости) на базе предлагаемой методики (машина трения), представлена на рис. 3. Коэффициент детерминации между эмпирическими и расчетными (аппроксимированными) значениями составляет $R^2 = 0,958$, что является показателем высокой сходимости данных.

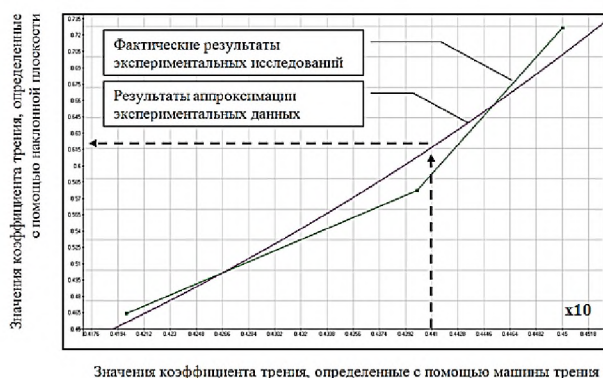


Рис. 3

Данная номограмма может быть использована для сведения результатов испытаний на машине трения по предлагаемой методике и наклонной плоскости к единому виду, что, в свою очередь, позволит сравнивать результаты экспериментов напрямую,

без необходимости в дополнительных измерениях с новыми материалами. Погрешность полученных таким способом данных существенно меньше разброса результатов испытаний на наклонной плоскости.

ВЫВОДЫ

1. Получено аналитическое выражение зависимости энергии активации трибосистемы от используемого материала.

На машине трения проведены триботехнические испытания текстильных материалов, используемых в составе композитов.

Исследуемые образцы подверглись испытаниям с применением базовой методики на наклонной плоскости, в результате чего получена зависимость между данными базовой и предлагаемой методик с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,958$.

2. Предполагается, что применение методики оценки коэффициента трения с использованием пары трения позволит свести к минимуму разброс результатов эксперимента, а значит увеличить точность получаемых данных об этой важной характеристике текстильных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения. – Самара: Изд. Самар. гос. техн. ун-та, 2000.

2. Королев П.В., Березина Е.В., Годлевский В.А., Калинин Е.Н. Концептуальные возможности метода молекулярной динамики для моделирования межмолекулярного взаимодействия в нанокompозитных

системах // Вестник научно-промышленного общества (Мат. междунар. науч.-техн. конф.: Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности, ИВГПУ-2013). – 2013. Вып. 20 (182). С. 16...19.

3. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977.

4. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968.

5. Brooks B.R., Bruccoleri R.E., Olafson B.D. et al. Charmm - a program for macromolecular energy, minimization, and dynamics calculations // Journal of Computational Chemistry. – № 4, 1983. P. 187...217.

6. Chiu S.W., Clark M., Balaji V., Subramaniam S., Scott H.L., Jakobsson E. Incorporation of surface tension into molecular dynamics simulation of interface: a fluid phase lipid bilayer membrane // Biophys. J. – V.69, 1995. P. 1230...1245.

7. Воронова Л.В., Смирнова Н.А., Флегонтов А.Н. Методика оценки коэффициента тангенциального сопротивления текстильных полотен // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, №1. С. 29...32.

REFERENCES

1. Berkovich I.I., Gromakovskij D.G. Tribologiya. Fizicheskie osnovy, mehanika i tehnicheckie prilozheniya. – Samara: Izd. Samar. gos. tehn. un-ta, 2000.

2. Korolev P.V., Berezina E.V., Godlevskij V.A., Kalinin E.N. Konceptualnye vozmozhnosti metoda

molekulyarnoj dinamiki dlya modelirovaniya mezhmolekulyarnogo vzaimodejstviya v nanokompozitnyh sistemah // Vestnik nauchno-promyshlennogo obshchestva (Mat. mezhhdunar. nauch.-tehn. konf.: Sovremennye naukoemkie tehnologii i perspektivnye materialy tekstilnoj i legkoj promyshlennosti, IVGPU-2013). – 2013. Vyp. 20 (182). S. 16...19.

3. Kragelskij I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Osnovy raschetov na trenie i iznos. – М.: Mashinostroenie, 1977.

4. Kragelskij I.V. Trenie i iznos. – М.: Mashinostroenie, 1968.

5. Brooks B.R., Bruccoleri R.E., Olafson B.D. et al. Charmm - a program for macromolecular energy, minimization, and dynamics calculations // Journal of Computational Chemistry. – № 4, 1983. R. 187...217.

6. Chiu S.W., Clark M., Balaji V., Subramaniam S., Scott H.L., Jakobsson E. Incorporation of surface tension into molecular dynamics simulation of interface: a fluid phase lipid bilayer membrane // Biophys. J. – V.69, 1995. R. 1230...1245.

7. Voronova L.V., Smirnova N.A., Flegontov A.N. Metodika ocenki koefficienta tangencialnogo soprotivleniya tekstilnyh poloten // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2013, №1. S. 29...32.

Рекомендована кафедрой материаловедения, товароведения, стандартизации и метрологии ИВГПУ. Поступила 23.05.18.