

МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. К. ПОГОСЯН

К ВОПРОСУ ПОЛУЧЕНИЯ МАСШТАБНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ПЕРЕХОДА ПРИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ НА ТРЕНИЕ

Наиболее целесообразным путем получения данных о возможности применения конкретной пары трения в конструкции являются испытания на малогабаритных образцах.

В рассматриваемой нами задаче влияние отдельных факторов, представленных различными величинами, проявляется не порознь, а совместно. По сути дела надо рассматривать не эти отдельные величины, а их совокупности, определенные для каждого данного процесса. Если испытания проводятся по одному (стандартному) определяющему параметру, например, температуре (ГОСТ 1786—57, ГОСТ 1786—66, РТМ 6-60), сопротивлению тепловому удару (теплоимпульсное трение), сопротивлению микрорезанию и т. п., то их результаты позволяют только построить сравнительный ряд материалов, оцениваемых только по этому параметру. Однако, применение сравнительного ряда по одному параметру не всегда дает удовлетворительную корреляцию с результатами натурных экспериментов. В таких случаях обычно принято считать, что не был учтен масштабный фактор, и это приводит к осуществлению различных видов фрикционной связи [1] на модели и натуре. Для того, чтобы учесть влияние масштабного фактора, необходимо и достаточно найти масштабные коэффициенты перехода от натуре к модели для каждого параметра, влияющего на процесс трения. Эти коэффициенты могут быть получены методами теории подобия и размерностей [2, 3]. Во многих случаях они представляют собой эффективное средство физического анализа.

Так как полное дифференциальное уравнение процесса трения пока не известно, то уравнения связи можно получить на основании рассмотрения модели процесса. На основе имеющихся зависимостей [1], статистики опытных данных и основных физических моделей [4] были установлены основные параметры, определяющие трение при повторно-кратковременном режиме торможений [5]. В табл. 1 приведены все эти параметры с их обозначениями, единицами измерения, символами и размерностью [3, 4].

По методике, разработанной проф. В. А. Вениковым [3] на базе π -теоремы анализа размерностей, находим критерии подобия. Приведем общую систему критериев подобия для процесса внешнего трения при повторно-кратковременном режиме торможений [5]:

Таблица 1

Наименование параметра	Определяющее уравнение и обозначения	Единица измерения	Символ	Размерность
Масса	$m_{1,2}$	килограмм	M	$кг$
Плотность	$\rho_{1,2,3}$	килогр. на куб. метр	ML^{-3}	$кг. м^{-3}$
Отношение теплоотдающей поверхности к теплопоглощающему объему элемента пары	$S_{1,2} = \frac{A_{1,2}}{V_{1,2}}$	квадратн. метр на куб. метр	L^{-1}	$м^{-1}$
Номинальная площадь трения	$A_{a1,2}$	квадратн. метр	L^2	$м^2$
Радиус единичной неровности	$r_{1,2}$	метр	L	$м$
Максимальная высота неровности шероховатой поверхности	$h_{1,2}$	метр	L	$м$
Модуль упругости	$E_{1,2} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$	ньютон на квадратн. метр	$ML^{-1}T^{-2}$	$кг. м^{-1}сек^{-2}$
Предел текучести (твердости)	$\Pi_{1,2} = \frac{m_{1,2}^{(0)}}{A_{a1,2}}$	ньютон на квадратн. метр	$ML^{-1}T^{-2}$	$кг. м^{-1}сек^{-2}$
Сопротивление сдвигу (срезу) пленок на поверхности трения	$\tau_{пл,2} = \frac{\tau}{\gamma}$	ньютон на квадратн. метр	$ML^{-1}T^{-2}$	$кг. м^{-1}сек^{-2}$
Нагрузка на пару трения	$P = m^{(0)}$	ньютон	MLT^{-2}	$кг. м сек^{-2}$
Скорость	$v = \frac{\Delta L}{\Delta t}$	метр на секунду	LT^{-1}	$м.сек^{-1}$
Ускорение	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	метр на секунду в квадр.	LT^{-2}	$м.сек^{-2}$
Продолжительность трения	t	секунда	T	$сек$

1	2	3	4	5
Температурная разность между температурой элемента и температурой среды	$\Delta\theta_{1,2} = \theta_{1,2} - \theta_3$	градус Кельвина	θ	град
Коэффициент теплопроводности	$\lambda_{1,2,3} = \frac{Q\Delta L}{tA_n\Delta\theta}$	ватт на метр	$MLT^{-2}\theta^{-1}$	вт. м. сек ⁻¹ град ⁻¹
Удельная теплоемкость	$c_{1,2,3} = \frac{Q}{m\Delta\theta}$	джоуль на килограмм градус	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	м ² . сек ⁻¹ град ⁻¹
Динамическая вязкость	$\eta_{1,2,3} = \frac{F\Delta L}{A_n\Delta\theta}$	ньютон сек. на квадратн. метр	$ML^{-1}T^{-2}$	вт. м ⁻¹ сек ⁻¹
Ускорение подъемной силы среды	κ^3	метр на сек. квадрат градус	$LT^{-2}\theta^{-1}$	м. сек ⁻² град ⁻¹
Коэффициент теплоотдачи	$\alpha_{1,2} = \frac{\Phi}{A_n\Delta\theta}$	ватт на коодр. метр градус	$MT^{-1}\theta^{-1}$	вт. сек ⁻¹ град ⁻¹
Температурный градиент	$\frac{d\theta_{1,2}}{dn_{1,2}}$	градус на метр	$L^{-1}\theta$	м ⁻¹ град
Задаваемая работа трения	$W_{тр}$	джоуль	ML^2T^{-2}	вт. м ² сек ⁻²
Коэффициент линейного расширения материалов пары трения	$\alpha_{1,2} = \frac{\Delta L}{L\Delta\theta}$	градус в минус первой степени	θ^{-1}	град ⁻¹
Работа, накопленная в элементах пары трения и окружающей среды, в виде тепла	$W_{п1,2,3} = \frac{W_{трмс}}{kA_{вен}t_{охл}}$	джоуль	ML^2T^{-2}	вт. м ² сек ⁻²

Примечание: индекс 1 относится к одному элементу, индекс 2—к другому элементу пары трения, индекс 3—к окружающей среде.

$$\begin{aligned}
& \frac{m_1 m_2 v^4}{P^2 A_{a_1}^{1/2} A_{a_2}^{1/2}}; \frac{\rho_1 \rho_2 \rho_3 v^0 A_{a_1}^{3/2} A_{a_2}^{3/2}}{P^4}; S_1 S_2 A_{a_1}^{1/2} A_{a_2}^{1/2}; \frac{r_1 r_2}{A_{a_1}^{1/2} A_{a_2}^{1/2}}; \frac{h_1 h_2}{A_{a_1}^{1/2} A_{a_2}^{1/2}}; \\
& \frac{E_1 E_2 A_{a_1} A_{a_2}}{P^2}; \frac{\Pi_1 \Pi_2 A_{a_1} A_{a_2}}{P^2}; \frac{\tau_{11} \tau_{22} A_{a_1} A_{a_2}}{P^2}; \omega A_{a_1}^{1/4} A_{a_2}^{1/4}; \\
& \frac{t v}{A_{a_1}^{1/4} A_{a_2}^{1/4}}; \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \Delta \theta_1^{3/2} \Delta \theta_2^{3/2} A_{a_1}^{3/4} A_{a_2}^{3/4}}{P^3 v^3}; \frac{c_1 c_2 c_3 \Delta \theta_1^{3/2} \Delta \theta_2^{3/2}}{v^0}; \frac{\tau_0 \tau_2 \tau_3 v^3 A_{a_1}^{3/4} A_{a_2}^{3/4}}{P^3}; \\
& \frac{(g \beta) A_{a_1}^{1/4} A_{a_2}^{1/4} \Delta \theta_1^{1/2} \Delta \theta_2^{1/2}}{v^2}; \frac{\sigma_1 \tau_2 A_{a_1} A_{a_2} \Delta \theta_1 \Delta \theta_2}{P^2 v^2}; \frac{\text{grad} \theta_1 \text{grad} \theta_2 A_{a_1}^{1/2} A_{a_2}^{1/2}}{\Delta \theta_1 \Delta \theta_2}; \\
& \frac{W_{n1}}{P A_{a_1}^{1/4} A_{a_2}^{1/4}}; \alpha_1 \alpha_2 \Delta \theta_1 \Delta \theta_2; \frac{W_{n1} W_{n2} W_{n3}}{P^3 A_{a_1}^{1/4} A_{a_2}^{1/4}}.
\end{aligned} \quad (1)$$

Путем известных преобразований из этой системы можно определить группы безразмерных выражений [3]. Группы безразмерных выражений получены таким образом, что в них входят параметры, характеризующие тот или иной основной процесс при трении. Такой способ группирования параметров для других процессов рекомендуется в работах [6, 7]. Целесообразность такого способа группирования показала и экспериментальная проверка [4].

В данном случае получены следующие безразмерные выражения (критерии):

теплофизический критерий

$$K_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \text{grad} \theta_1 \text{grad} \theta_2}{c_1 c_2 c_3 \rho_1 \rho_2 \rho_3} \cdot \frac{W_{n1} W_{n2} W_{n3}}{P^3 v^3 A_{a_1} A_{a_2} \Delta \theta_1 \Delta \theta_2}; \quad (2)$$

критерий теплопередачи

$$K_2 = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{(g \beta) t} \cdot \frac{A_{a_1} A_{a_2} \Delta \theta_1^{1/2} \Delta \theta_2^{1/2}}{P^2 v}; \quad (3)$$

физико-механический критерий

$$K_3 = \frac{E_1 E_2 \tau_{11} \tau_{22}}{\Pi_1 \Pi_2 \tau_0 \tau_2 \tau_3 W_{n1}} \cdot \frac{A_{a_1}^{1/2} A_{a_2}^{1/2} P^2}{v^3}; \quad (4)$$

критерий макро- и микрогеометрии контактирования

$$K_4 = \frac{S_1 S_2 r_1 r_2}{h_1 h_2} \cdot \frac{A_{a_1}^{1/2} A_{a_2}^{1/2}}{v}; \quad (5)$$

динамический критерий

$$K_5 = m_1 m_2 \omega \tau_1 \tau_2 \cdot \frac{v^2 \Delta \theta_1 \Delta \theta_2}{P^2 A_{a_1}^{1/2} A_{a_2}^{1/2}}. \quad (6)$$

Функцию коэффициента трения для натуры можно записать так [4]:

$$f = f_2(K_1, K_2, K_3, K_4, K_5).$$

При моделировании процесса внешнего трения необходимо, согласно первой теореме теории подобия, чтобы для лабораторного об-

разца (модели) и натуры указанные выше критерии были равны, то есть:

$$K_1 = K_1'; K_2 = K_2'; K_3 = K_3'; K_4 = K_4'; K_5 = K_5', \quad (7)$$

где символы со штрихом относятся к модели.

Критерии подобия запишем в симплексной форме:

$$\frac{C_4 C_{гр\alpha\beta} C_{\kappa\pi}}{C_1 C_2 C_p^3 C_5^1 C_6 C_{\Delta\beta}} = 1; \quad \frac{C_9 C_a C_{\Delta\beta}^{1,2}}{C_{(K\beta)} C_1 C_p^2 C_v} = 1; \quad (8)$$

$$\frac{C_2 C_5 C_6^{1,2} C_p^2}{C_a C_{\kappa\pi} C_{\Delta\beta}^3} = 1; \quad \frac{C_7 C_7 C_{\Delta\beta}^{1,2}}{C_h} = 1; \quad \frac{C_m C_{\omega} C_3 C_{\Delta\beta}^3 C_{\Delta\beta}}{C_p^2 C_a^{1,1}} = 1,$$

где

$$C_3 = \frac{\lambda_1' \lambda_2' \lambda_3'}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}; \quad C_a = \frac{A_{a_1}' A_{a_2}'}{A_{a_1} A_{a_2}} \text{ и т. д.}$$

Прологарифмировав критерии системы (8), получим систему из 5-ти линейных уравнений, где свободными членами являются симплексы номинальной площади касания C_{π} .

В результате решения системы уравнений относительно C_{π} , после потенцирования, были получены масштабные коэффициенты перехода от натуры к модели для моделирования процесса трения при повторно-кратковременном режиме торможений. Полученные переходные коэффициенты были выражены через комплекс геометрических размеров натуры и модели $K_{a\pi}$ [4]:

$$K_{a\pi} = \frac{K_{\pi} S_1 S_2 (A_a')^2}{K_{\pi} S_1 S_2 A_a^2}, \quad (9)$$

где K_{π} — коэффициент взаимного перекрытия трущихся поверхностей.

В табл. 2 приведены полученные масштабные коэффициенты перехода для трех вариантов с различными начальными условиями.

Таблица 2

Варианты	Масштабные коэффициенты перехода						
	C_m	C_p	C_v	$C_{\kappa\pi}$	$C_{\omega\pi}$	C_h	C_f
I	$K_{a\pi}^{-2,3}$	1	$K_{a\pi}^{2,3}$	$K_{a\pi}^{-5,3}$	$K_{a\pi}^{1,3}$	$K_{a\pi}^{-1,3}$	1
II	$K_{a\pi}^{5,6}$	$K_{a\pi}^{-1,3}$	1	$K_{a\pi}$	$K_{a\pi}^{1,3}$	$K_{a\pi}^{-1,3}$	1
III	$K_{a\pi}^{1,6}$	1	1	$K_{a\pi}^{1,3}$	$K_{a\pi}^{2,3}$	$K_{a\pi}^{-1,3}$	$K_{a\pi}^{2,3}$

При лабораторных испытаниях на трение, для режима повторно-кратковременных торможений, следует учесть также переходные коэффициенты частоты торможений и суммарного времени рабочего цикла [8].

С учетом масштабного фактора, на лабораторных образцах, с достаточной точностью можно воспроизводить процессы внешнего трения реальных объектов [5, 8].

Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Поступило 4.III.1970.

Ա. Կ. ՍՈՍՈՅԱՆ

ՇՓՈՐԱՆ ԼԱՅՈՐԱՏԱՐ ՓԱՐՉԱՐԿՈՒՄՆԵՐԻ ԺԱՄԱՆԱԿ ԱՆՑՄԱՆ ՄԱՍԵՏԱՐԱՅԻՆ ԿՈՐՄԱԿԻՑՆԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՇՈՐԻՋԸ

Ա մ փ ո փ ու լ մ

Նմանության և չափայնության տեսության ապարատի օգտագործմամբ քննարկված է փոքր ծավալաչափի փորձանմուշները շփման փորձարկելիս նատուրայից մոդելին անցնելու մասշտաբային գործակիցներ ստանալու հարցը՝ կարճատև-կրկնվող աշխատանքային ռեժիմի դեպքում: Բերված է նմանության չափանիշների բնոչանությունը սխալներ, որն առաջված է չափայնության վերլուծության Դ-ֆևորեմի հիման վրա: Որոշված են չափայնությունը շունեցող արտահայտությունների (չափանիշների) խմբերը, առաջված աշխատանք, որ նրանց մեջ մտնում են շփման ժամանակ այս կամ այն հիմնական պարամետրները: Մտադրված են անցման մասշտաբային գործակիցները՝ արտահայտված նատուրայի և մոդելի երկրաչափական չափերի կոմպլեքսով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Крателецкий И. В. Трение и износ. Изд. «Машиностроение», 1968.
2. Седов А. И. Методы подобия и размерности в механике. Изд. «Наука», 1967.
3. Венников В. А. Теория подобия и моделирование. Изд. «Высшая школа», 1966.
4. Чичинадзе А. В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. Изд. «Наука», 1967.
5. Браун Э. Д., Сосоян А. К. Применение теории подобия и размерности для моделирования трения при повторно-кратковременном фрикционном тепловом нагружении. Сб. докладов пятой междоузовской конференции по физическому и математическому моделированию «Применение цифрового моделирования». МЭИ, 1968.
6. Иллюшин А. А. О состоянии и приложениях к процессам обработки металлов давлением общей теории пластичности. Сб. «Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением», ЦНИИЧЕРМЕТ, 1963.
7. Шорик С. Н. Теплопередача. Гостройиздат, 1952.
8. Сосоян А. К. Моделирование процесса внешнего трения колодных тормозов подъемно-транспортных машин. «Вестник машиностроения». № 11, 1968.