

УДК 539.3

РАСЧЕТ ИЗНОСА РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ СЛУЧАЙНО ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ТЕМПЕРАТУРЕ И НАГРУЗКЕ

© 2023 г. И. А. Солдатенков^{a,*}

^aИнститут проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

*e-mail: iasoldat@hotmail.com

Поступила в редакцию 29.08.2022 г.

После доработки 10.09.2022 г.

Принята к публикации 19.09.2022 г.

Описывается стохастическая модель процесса изнашивания тонкого покрытия в радиальном подшипнике скольжения, учитывающая случайные изменения температуры подшипника и внешней нагрузки. Приводятся результаты численного анализа процесса изнашивания подшипника применительно к условиям работы в открытом космосе на околоземных орбитальных станциях. Оценивается важность учета случайных изменений температуры и внешней нагрузки для прогнозирования износа подшипника и, в частности, его долговечности.

Ключевые слова: контактная задача, износ, покрытие, радиальный подшипник скольжения, температура, нагрузка

DOI: 10.31857/S0572329922600669, EDN: DHFXLU

Введение. Расчет радиального подшипника скольжения на износ является предметом многочисленных работ, в которых учитывались различные факторы процесса изнашивания: смазка, поверхностная шероховатость, наличие покрытия, фрикционный разогрев, перекос вала и др. [1–5].

Ниже описывается метод расчета процесса изнашивания антифрикционного покрытия (тонкого вкладыша) в радиальном подшипнике скольжения в условиях случайно изменяющихся температуры и внешней нагрузки (величина, направление). Подобные условия характерны, например, для узлов трения, работающих в открытом космосе на околоземных орбитальных станциях [6–9]. Изменение температуры узла трения в этом случае обусловлено его заходом в тень Земли или станции и по разным оценкам лежит в диапазоне от -150°C до $+150^{\circ}\text{C}$. Для таких узлов трения также следует ожидать значительного разброса величины и направления внешней нагрузки, что обуславливается отсутствием постоянной силы тяжести, как основного фактора нагружения.

Отметим, что ранее был выполнен расчет изнашивания радиального подшипника скольжения применительно к условиям работы на орбитальных станциях, который учитывал периодическое изменение температуры подшипника, однако нагрузка при этом считалась постоянной [10]. Также был предложен метод расчета радиального подшипника скольжения на износ в условиях случайно изменяющейся внешней нагрузки при неизменной температуре [3].

Цель описываемых ниже исследований состоит в учете и оценке значимости факторов случайного изменения температуры и внешней нагрузки при моделировании процесса изнашивания радиального подшипника скольжения с покрытием.

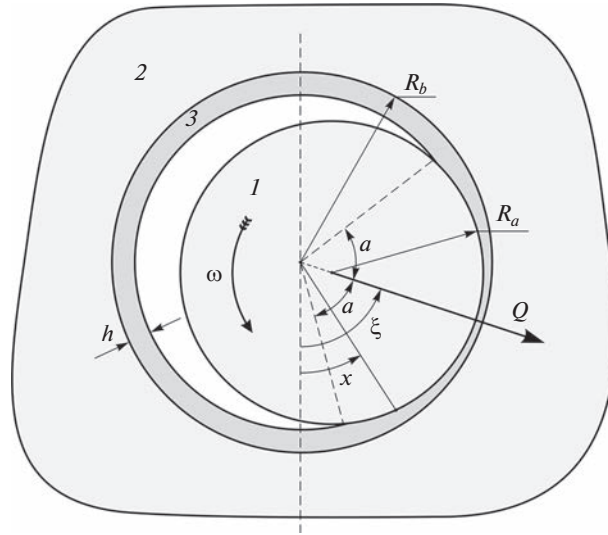


Рис. 1. Схема контакта вала 1 с покрытием 3, связанным с обоймой 2 радиального подшипника скольжения.

1. Постановка задачи и основные уравнения. Рассмотрим радиальный подшипник скольжения (далее — подшипник), в котором вращающийся вал 1 взаимодействует с тонким покрытием 3, связанным с обоймой 2 (рис. 1). Контактное взаимодействие вала с покрытием определяется величиной Q внешней нагрузки на вал и углом $\xi \in [-\pi, \pi]$ ее приложения, который отсчитывается от вертикали (рис. 1). Соответствующая область контакта задается угловым размером a . Все элементы подшипника имеют одинаковую температуру T и при ее изменении размеры подшипника меняются вследствие теплового расширения тел. Точки поверхности покрытия задаются с помощью угловой координаты x .

Считается, что покрытие в исходном состоянии, т.е. при $t = 0$, имеет постоянную толщину h_0 . В результате взаимодействия с валом покрытие изнашивается и это приводит к изменению его толщины h как по координате x , так и во времени t . В каждый момент процесса изнашивания покрытия величины T , ξ , Q могут принимать случайные значения, т.е. они являются случайными функциями времени t (процессами) [11, 12].

Скорость износа покрытия в точке x в каждый момент времени t определяется величиной контактного давления $p(x, t)$, скоростью V скольжения и температурой T подшипника согласно закону изнашивания [1, 3]:

$$\frac{\partial W(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial h(x, t)}{\partial t} = F(p(x, t), V, T) \quad (1.1)$$

где $W(x, t) = h_0 - h(x, t)$ — линейный износ покрытия, вид функции $F(p, V, T)$ будет конкретизирован ниже при численном анализе.

Скорость скольжения определяется по формуле $V = \omega R_a$, в которой ω — угловая скорость вращения вала, считающаяся постоянной, R_a — радиус вала, износом которого будем пренебрегать. Отметим, что при изменении температуры радиус R_a может меняться вследствие теплового расширения вала. Однако это изменение мало по сравнению с самим радиусом R_a и не оказывает заметного влияния на скорость скольжения $V = \omega R_a$, которую, как и угловую скорость ω , можно считать постоянной.

Допустим, что случайные изменения величин T, ξ, Q приводят к тому, что на поверхности изнашиваемого покрытия отсутствует приработанная к форме вала лунка износа. Вместо этого износ распределяется достаточно равномерно по поверхности покрытия, и это позволяет пренебречь изменением толщины изношенного покрытия в пределах области контакта по сравнению с самой толщиной, положив

$$h(x, t) = h(\xi, t), \quad x \in [-a, a] \quad (1.2)$$

Толщину h тонкого покрытия можно считать малой по сравнению с размером $2aR_a$ области контакта. Кроме того, предполагая, что модуль упругости покрытия значительно меньше модулей упругости вала и обоймы подшипника, будем считать вал и обойму абсолютно жесткими.

Ставится задача: построить стохастическую модель процесса изнашивания покрытия в подшипнике, учитывающую случайный характер величин T, ξ, Q .

Для построения такой модели рассмотрим вначале контактное взаимодействие вала и покрытия при некоторых фиксированных значениях T, ξ, Q и заданной толщине $h(x, t)$.

Учитывая сделанные выше допущения относительно толщины и модуля упругости покрытия, а также пренебрегая силой трения, воспользуемся моделью Винклера [13] для описания упругого поведения покрытия. В результате можно прийти к следующему выражению для контактного давления [3]

$$p(x, t) = \mathcal{P}(x, t; T, \xi, Q) \equiv \begin{cases} \frac{\Delta}{B(T)h(\xi, t)} \left(\frac{\cos(x - \xi)}{\cos a} \right), & \cos(x - \xi) \geq \cos a \\ 0, & \cos(x - \xi) < \cos a \end{cases} \quad (1.3)$$

где

$$\Delta = R_b(T) - R_a(T) - h(\xi, t) \quad (1.4)$$

– радиальный зазор подшипника, $\Delta \ll R_a(T)$,

$$B(T) = \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{(1 - \nu)E(T)} \quad (1.5)$$

– коэффициент податливости покрытия, E и ν – модуль упругости (Юнга) и коэффициент Пуассона покрытия, размер a области контакта находится из уравнения

$$\frac{a}{\cos a} - \sin a = \frac{QB(T)h(\xi, t)}{R_a(T)\Delta} \quad (1.6)$$

В представленных выражениях не учитывается изменение толщины h покрытия в результате его теплового расширения, что допустимо для тонкого покрытия – соответствующее обоснование дано ниже (раздел 2). Кроме того, без ограничения общности рассмотрения, коэффициент Пуассона в выражении (1.5) считается независимым от температуры.

Примем теперь во внимание случайный характер величин T, ξ, Q и введем в рассмотрение соответствующую функцию плотности вероятности $\rho(T, \xi, Q, t)$ [11]. В дальнейшем, для упрощения записи формул будут использоваться обозначения:

$$X_1 = T, \quad X_2 = \xi, \quad X_3 = Q \quad (1.7)$$

Для описания рассматриваемого процесса изнашивания покрытия воспользуемся известным подходом, основанным на статистическом осреднении закона изнашивания (1.1) по параметрам T, ξ, Q [3]. Результатом такой операции является равенство

$$\frac{\partial h(x, t)}{\partial t} = - \int_{\{X\}} F(\mathcal{P}(x, t; X), V, X_1) \rho(X, t) dX \quad (1.8)$$

в котором h уже представляет собой среднее статистическое значение толщины покрытия. Для краткости символом X здесь обозначается совокупность величин X_1, X_2, X_3 , запись $\{X\}$ обозначает множество допустимых значений этих величин, $dX = dX_1 dX_2 dX_3$.

Если случайные величины X_1, X_2, X_3 в каждый момент времени t являются независимыми и стационарными как случайные процессы, то [11, 12]:

$$\rho(X, t) = \rho_1(X_1) \rho_2(X_2) \rho_3(X_3) \quad (1.9)$$

где $\rho_i(X_i)$, $i = 1, 2, 3$ — функция плотности вероятности величины X_i . Если дополнительно какая-либо из величин X_i не является случайной и принимает постоянное значение $\hat{X}_i$, то в равенстве (1.8) следует формально положить

$$\rho_i(X_i, t) = \delta(X_i - \hat{X}_i), \quad i = 1, 2, 3 \quad (1.10)$$

где $\delta(X)$ — дельта-функция.

Указанная выше функция $\mathcal{P}(x, t; X)$ определяется равенствами (1.3)–(1.6) с учетом обозначений (1.7), поэтому равенство (1.8) представляет собой дифференциальное уравнение, которое при начальном условии

$$h(x, 0) = h_0 \quad (1.11)$$

описывает кинетику изменения толщины изнашиваемого покрытия в терминах средних значений. Равенства (1.3)–(1.6), (1.8) составляют стохастическую модель процесса изнашивания покрытия в подшипнике и тем самым решают поставленную выше задачу.

Одной из важнейших характеристик процесса изнашивания покрытия является его долговечность, которая определяется как время t_* полного изнашивания покрытия в некоторой точке, т.е.

$$\min_{x \in [-a, a]} h(x, t_*) = 0 \quad (1.12)$$

В дальнейшем для сравнения будут использоваться результаты расчета процесса изнашивания покрытия в подшипнике при детерминированной постановке, т.е. при неизменной температуре и постоянной по величине и направлению внешней нагрузке. Для решения такой задачи необходимо учитывать локальный характер изнашивания покрытия, который выражается в существовании приработанной к валу лунки износа с монотонно возрастающим размером $a(t)$ области контакта [2, 3, 13]. Такой процесс описывается уравнением (1.1) с начальным условием (1.11) и равенствами

$$p(x, t) = \frac{1}{Bh(x, t)} \left[\Delta \left(\frac{\cos x}{\cos a(t)} - 1 \right) - W(x, t) \right], \quad x \in [-a(t), a(t)] \quad (1.13)$$

$$Q = R_a \int_{-a(t)}^{a(t)} p(x, t) \cos x \, dx \quad (1.14)$$

первое из которых является следствием условия контакта вала и покрытия, а второе представляет собой условие равновесия вала [3]. Подстановка выражения (1.13) для контактного давления в равенство (1.14) при $t = 0$, $h(x, 0) = h_0$, $W(x, 0) = 0$ позволяет получить для начального размера $a_0 = a(0)$ области контакта уравнение, имеющее вид (1.6). Отметим, что здесь все величины являются детерминированными.

Замечание. Для решения задачи об изнашивании покрытия при детерминированной постановке, т.е. при $X_1 = \hat{X}_1$, $X_2 = \hat{X}_2$, $X_3 = \hat{X}_3$, недопустимо использовать описанную выше стохастическую модель с функциями плотности вероятности вида (1.10) для всех величин X_1, X_2, X_3 . Действительно, в таком виде стохастическая модель приводит к образованию приработанной лунки износа и, следовательно, к нарушению допущения (1.2).

2. Численный анализ. Излагаемый далее материал связан с анализом результатов расчетов процесса изнашивания покрытия в подшипнике. Целью анализа является оценка важности учета случайных изменений температуры и внешней нагрузки для прогнозирования износа и, в частности, долговечности подшипника. Для проведения соответствующих расчетов следует конкретизировать некоторые аспекты описанных выше стохастической и детерминированной моделей процесса изнашивания покрытия.

При выборе параметров материала покрытия для расчетов будем ориентироваться на использование самосмазывающихся композитов, в том числе, на полимерной основе. Подобные композиты успешно используются в качестве антифрикционных материалов в узлах трения, работающих в открытом космосе на околоземных орбитальных станциях в условиях вакуума и при значительных перепадах температуры [6–9].

Как показывают эксперименты [14–16], для полимерных композитов характерно существенное снижение модуля упругости с ростом температуры, которое может достигать нескольких порядков. По этой причине для расчетов воспользуемся экспоненциальной зависимостью [15]

$$E(T) = E_0 \exp(k_E \theta), \quad E_0 = E(T_0) \quad (2.1)$$

с отрицательным параметром k_E , в которой $\theta = T - T_0$ — температура, отсчитываемая от нормальной температуры T_0 . Подстановка выражения (2.1) в равенство (1.5) определяет температурную зависимость $B(T)$ коэффициента податливости покрытия.

Будем использовать линейный закон изнашивания (1.1), т.е. допустим, что

$$F(p, V, T) = \alpha(T) p V$$

где α — коэффициент износа, величина которого зависит от температуры.

Результаты трибологических испытаний свидетельствуют о том, что с ростом температуры скорость $\partial W / \partial t$ износа полимерных композитов может претерпевать значительные изменения, достигающие нескольких порядков [15, 17–19]. В отличие от температурной зависимости (2.1) модуля упругости, зависимость скорости износа от температуры может быть как возрастающей, так и убывающей. С учетом указанных обстоятельств, примем экспоненциальную зависимость коэффициента износа от температуры:

$$\alpha(T) = \alpha_0 \exp(n_\alpha \theta), \quad \alpha_0 = \alpha(T_0) \quad (2.2)$$

в которой параметр n_α может принимать как отрицательные, так и положительные значения.

При увеличении температуры подшипника происходит тепловое расширение вала и обоймы, учитываемое в равенстве (1.4). В рассматриваемом случае тонкого и мягкого покрытия можно пренебречь его влиянием на расширение обоймы, полагая [10, 20]:

$$R_i(T) = R_{i0}(1 + k_i \theta), \quad R_{i0} = R_i(T_0), \quad i = a, b \quad (2.3)$$

где k_a и k_b — коэффициенты линейного теплового расширения вала и обоймы. Отметим, что, если в подшипнике вместо тонкого покрытия используется толстый вкладыш, то для определения теплового расширения обоймы следует использовать решение соответствующей термоупругой задачи [10].

Для функции плотности вероятности $\rho(X, t)$ случайных величин X_1, X_2, X_3 воспользуемся выражением (1.9), считая эти величины независимыми и стационарными во времени. Соответствующие функции плотности вероятности зададим выражениями

$$\rho_1(X_1) = \frac{1}{T^+ - T^-}, \quad X_1 = T \in [T^-, T^+] \quad (2.4)$$

$$\rho_2(X_2) = \frac{1}{2\pi A_\xi} (\cos X_2 + A_\xi), \quad A_\xi \geq 1, \quad X_2 = \xi \in [-\pi, \pi] \quad (2.5)$$

$$\rho_3(X_3) = \frac{1}{Q_m A_Q} (\cos S + A_Q), \quad S = 2\pi \frac{X_3 - Q_m/2}{Q_m}, \quad A_Q \geq 1, \quad X_3 = Q \in [0, Q_m] \quad (2.6)$$

в которых параметры $T^\pm$ и Q_m определяют диапазоны изменений температуры T и нагрузки Q . Выражения (2.4)–(2.6) удовлетворяют нормировочному условию, налагаемому на функцию плотности вероятности [11], а определяемые по ним средние значения случайных величин X_1, X_2, X_3 составляют:

$$\bar{X}_1 = \bar{T} = (T^- + T^+)/2, \quad \bar{X}_2 = \bar{\xi} = 0, \quad \bar{X}_3 = \bar{Q} = Q_m/2$$

Отметим, что функция $\rho_1(X_1)$ вида (2.4) описывает равновероятное распределение температуры $T = X_1$, тогда как функции $\rho_2(X_2)$ и $\rho_3(X_3)$ вида (2.5) и (2.6) допускают повышенную вероятность значений угла $\xi = X_2$ и нагрузки $Q = X_3$ вблизи их средних значений 0 и $Q_m/2$ соответственно.

С учетом экспериментальных данных по полимерным композитам из упомянутых выше литературных источников, для расчетов процесса изнашивания покрытия были выбраны следующие значения трибофизических параметров:

$E = 1$ ГПа, $\nu = 0.3$, $k_E = -0.01$ К⁻¹, $\alpha_0 = 10^{-15}$ Па⁻¹, $n_\alpha = 0.02$ К⁻¹, $k_a = 2 \times 10^{-5}$ К⁻¹, $k_b = 3 \times 10^{-5}$ К⁻¹, $T_0 = 293$ К (20°С).

Геометрические параметры подшипника и условия его работы определялись значениями

$h_0 = 0.5$ мм, $R_{a0} = 10$ мм, $R_{b0} = 10.55$ мм, $\omega = 2\pi$ с⁻¹, $A_\xi = 1$ или 2, $A_Q = 1$, $Q_m = 50$ кН/м, $\bar{Q} = 25$ кН/м, $T^- = 143$ К (-130°С), $T^+ = 443$ К (170°С), $\bar{T} = T_0$.

Отметим, что при выбранных значениях h_0 , R_{a0} , R_{b0} начальный зазор подшипника составляет $\Delta_0 = R_{b0} - R_{a0} - h_0 = 0.05$ мм, а указанные значения коэффициентов линейного теплового расширения вала k_a и обоймы k_b характерны для алюминиевых и магниевых сплавов [21]. Выбранный диапазон изменения температуры соответствует условиям работы узлов трения в открытом космосе на околоземных орбитальных станциях.

В качестве оценки коэффициента k_c линейного теплового расширения полимерных композитов можно использовать значение 10^{-5} К⁻¹ [21]. При таком значении k_c и выбранном диапазоне изменения температуры относительное изменение толщины h покрытия из полимерного композита в результате теплового расширения не превышает $\pm 1.5 \times 10^{-3}$, а относительное изменение зазора Δ не превышает $\pm 2.5 \times 10^{-2}$. Приведенные оценки обосновывают сделанное в предыдущем разделе допущение о возможности не учитывать изменение толщины h покрытия, обусловленное тепловым расширением.

Расчеты процесса изнашивания покрытия проводились с использованием стохастической (1.3)–(1.6), (1.8) и детерминированной (1.1), (1.13), (1.14) моделей. Численное решение соответствующих дифференциальных уравнений строилось на основе явной по времени разностной схемы [22], при этом для детерминированной постанов-

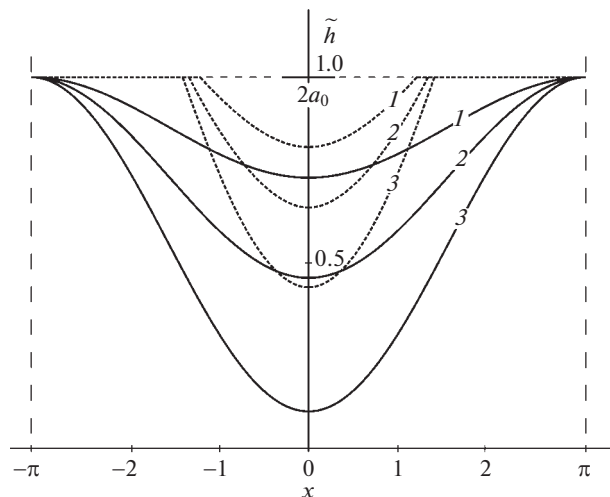


Рис. 2. Профили изношенного покрытия в различные моменты времени $\tilde{t}$: 8.03 (1), 16.1 (2), 26.8 (3) (стохастическая постановка задачи, $A_\xi = 1$). Штриховыми линиями показаны профили изношенного покрытия в те же моменты времени при детерминированной постановке задачи.

ки задачи монотонно возрастающий размер a области контакта использовался в качестве временного параметра [3].

С целью оценки важности учета случайных изменений температуры и внешней нагрузки при расчете износа покрытия, рассматривались различные варианты с одной или двумя постоянными величинами из числа T , ξ , Q . Для таких величин использовались соответствующие представления (1.10) функции плотности вероятности. Для варианта, допускающего постоянство всех трех величин T , ξ , Q , расчет процесса изнашивания проводился на основе детерминированной модели.

Полученные результаты расчетов представлены ниже с использованием безразмерных величин $\tilde{h} = h/h_0$ и $\tilde{t} = t/t_c$, $t_c = 10^5 \text{ с} \approx 27.8 \text{ ч}$.

На рис. 2 показаны профили изношенного покрытия в различные моменты времени $\tilde{t}$: 8.03 (1), 16.1 (2), 26.8 (3). Расчеты проводились в предположении, что все величины T , ξ , Q случайные с функциями плотности вероятности вида (2.4)–(2.6) и $A_\xi = 1$. Для сравнения пунктирными линиями показаны профили изношенного покрытия в те же моменты времени, но при постоянных значениях $T = \bar{T}$, $\xi = \bar{\xi} = 0$, $Q = \bar{Q}$. Соответствующая этим значениям начальная длина $2a_0 = 0.601$ области контакта обозначена на рисунке отдельным отрезком.

На рис. 3 показаны профили изношенного покрытия в различные моменты времени $\tilde{t}$: 10.7 (1), 21.4 (2), 35.8 (3). Все величины T , ξ , Q здесь считались случайными, однако, в отличие от рис. 2, расчеты проводились при $A_\xi = 2$.

В таблице представлены значения долговечности $\tilde{t}_* = t_*/t_c$ покрытия, определяемой из условия (1.12), для вариантов с различными сочетаниями постоянных и случайных величин из числа T , ξ , Q . Постоянный характер величины при этом отмечается символом “с”, а случайный – символом “г”. Для сравнения в таблице указана дол-

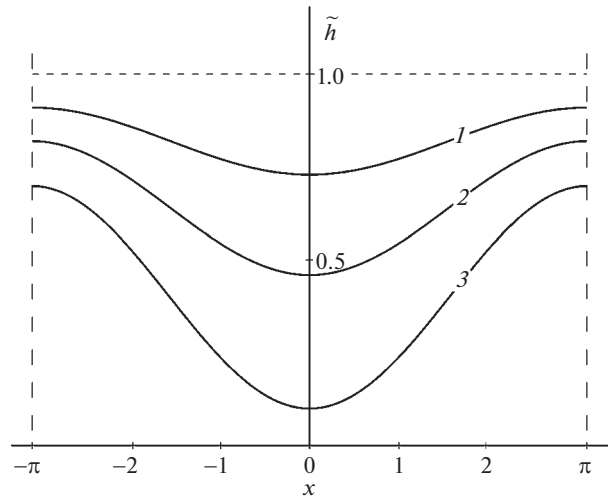


Рис. 3. Профили изношенного покрытия в различные моменты времени $\tilde{t}$: 10.7 (1), 21.4 (2), 35.8 (3) (стохастическая постановка задачи, $A_{\xi} = 2$).

говечность покрытия при всех трех постоянных величинах T , ξ , Q , рассчитанная на основе детерминированной модели (вариант 4).

3. Обсуждение результатов. Представленные на рис. 2 и 3 графики показывают, что максимальное изнашивание покрытия, как и следовало ожидать, происходит при $x = 0$, т.е. в центральной части подшипника. Именно эта часть, согласно выражению (2.5), с наибольшей вероятностью подвержена контактному взаимодействию с валом. При детерминированной постановке задачи износ покрытия также концентрируется в центральной части подшипника в направлении $\xi = 0$ ($x = 0$) приложения постоянной нагрузки Q (пунктирные линии на рис. 2). Однако в отличие от стохастической постановки задачи, здесь износ носит локальный характер и представляет собой монотонно растущую лунку износа.

Сопоставление сплошных линий (стохастическая постановка задачи) и соответствующих им по времени пунктирных линий (детерминированная постановка задачи) на рис. 2, а также вариантов 3 и 4 в таблице позволяет сделать общий вывод о важности учета факторов случайности величин T , ξ , Q при расчете износа подшипника. Действительно, использование детерминированной модели (вариант 4) приводит к оценке долговечности t_* покрытия в 1.63 раза завышенной по сравнению с оценкой по стохастической модели (вариант 3).

Наиболее значимым представляется фактор случайности направления ξ внешней нагрузки. Это проявляется, например, в том, что значение параметра A_{ξ} функции плотности вероятности (2.5) величины ξ оказывает качественное влияние на распределение износа по поверхности покрытия (рис. 2 и 3) и существенно влияет на оценку долговечности t_* покрытия (таблица). Однако фактор случайности величины нагрузки Q представляется малозначимым. Например, сравнение вариантов 2 и 3 таблицы показывает, что учет случайного изменения величины нагрузки Q не оказывает заметного влияния на оценку долговечности t_* покрытия.

Существенное влияние на результаты расчета износа покрытия оказывает фактор случайности температуры T — это, например, следует из сравнения значений долго-

Таблица 1. Значения долговечности покрытия для различных вариантов изменения температуры и нагрузки

№ варианта	T	ξ	Q	$A_{\xi} = 1$	$A_{\xi} = 2$
1	с	г	г	100.44	133.93
2	г	г	с	29.82	39.75
3	г	г	г	29.85	39.80
4	с	с	с	48.66	48.66

вечности t_* покрытия для вариантов 1 и 3 таблицы. Такое влияние обусловлено тем, что модуль упругости E и коэффициент износа α в значительной степени зависят от температуры согласно равенствам (2.1) и (2.2).

4. Выводы. 1. Предложена стохастическая модель процесса изнашивания тонкого покрытия в радиальном подшипнике скольжения, учитывающая случайные изменения температуры подшипника и внешней нагрузки.

2. Выполнен численный анализ процесса изнашивания покрытия, ориентированный на условия работы узлов трения в открытом космосе на околоземных орбитальных станциях.

3. Дана оценка значимости факторов случайного изменения температуры и внешней нагрузки при расчете износа подшипника. В частности, установлено, что наибольшую значимость имеют факторы случайности температуры подшипника и направления внешней нагрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-49-02010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
2. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. М.: Машиностроение, 1988. 254 с.
3. Солдатенков И.А. Износостойкость контактная задача с приложениями к инженерному расчету износа. М.: Физматкнига, 2010. 160 с.
4. Jang J.Y., Khonsari M.M. On the characteristics of misaligned journal bearings // Lubricants. 2015. V. 3. P. 27–53. <https://doi.org/10.3390/lubricants3010027>
5. Sano T., Nakasone T., Katagiri T., Okamoto Y. A Study on wear progress of plain bearing under mixed lubrication condition // SAE Int. J. Eng. 2011. V. 4. P. 569–580. <https://doi.org/10.4271/2011-01-0609>
6. Маленков М.И., Каратушин С.И., Тарасов В.М. Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2007. 54 с.
7. Spacecraft Systems Engineering / Ed. P. Fortescue, G. Swinerd, J. Stark. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
8. Броневец М.А. Трибология и космические транспортные системы // Вестн. РГУПС. 2017. № 1. С. 18–23.
9. Мышкин Н.К., Григорьев А.Я., Басинюк В.Л., Мардосевич Е.И., Ковальчук Г.Ф., Папина С.С., Ковалева И.Н., Кудрицкий В.Г. Космическая трибология: состояние и перспективы // Механика машин, механизмов и материалов. 2012. № 3–4 (20–21). С. 126–130.
10. Александров В.М., Броневец М.А., Солдатенков И.А. Математическое моделирование изнашивания подшипника скольжения в условиях открытого космоса // Трение и износ. 2008. Т. 29. № 3. С. 238–245.

11. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятности и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.
12. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2000. 384 с.
13. *Механика контактных взаимодействий / Под ред. И.И. Воровича, В.М. Александрова.* М.: Физматлит, 2001. 670 с.
14. *Friedrich K., Schlarb A.K.* Tribology of Polymeric Nanocomposites // Amsterdam: Elsevier, 2008.
15. *Polymer Tribology / Ed. S. K. Sinha, B. J. Briscoe.* London: Imperial College Press, 2009.
16. *Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Под ред. А.В. Герасимова.* Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 311 с.
17. *Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В.* Трение и износ полимеров. Л.: Химия, 1972. 240 с.
18. *Fusaro R.L., Sliney H.E.* Lubricating characteristics of polyimide bonded graphite fluoride and polyimide thin films // ASLE Trans. 1973. V. 16. P. 189–196.
<https://doi.org/10.1080/05698197308982721>
19. *Burris D.L.* Investigation of the tribological behavior of polytetrafluoroethylene at cryogenic temperatures // Tribology Trans. 2008. V. 51. P. 92–100.
<https://doi.org/10.1080/10402000701660618>
20. *Кикоин А.К., Кикоин И.К.* Молекулярная физика. М.: Наука, 1976. 480 с.
21. *Физические величины: справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова.* М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
22. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 586 с.