ИЗВЕСТИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. МЕХАНИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА 2023, № 2, с. 166–175

УДК 539.3

РАСЧЕТ ИЗНОСА РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ СЛУЧАЙНО ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ТЕМПЕРАТУРЕ И НАГРУЗКЕ

И. А. Солдатенков[a,*]

[a] *Институт 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°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.

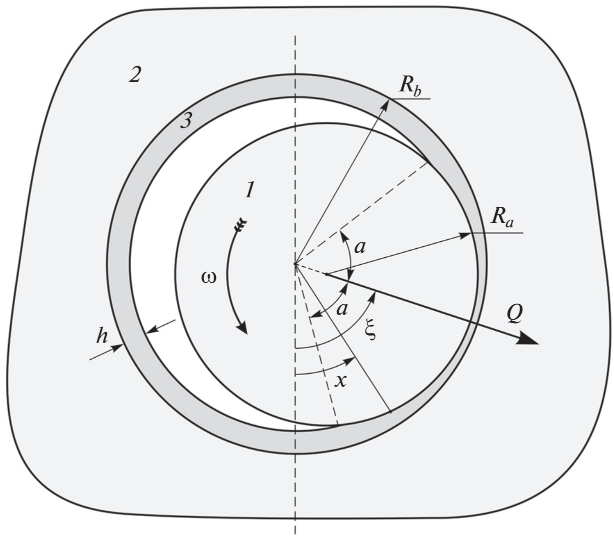

Рис. 1. Схема контакта вала *1* с покрытием *3*, связанным с обоймой *2* радиального подшипника скольжения.

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]:

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

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

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

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]

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

где

$$\Delta = R_b(T) - R_a(T) - h(\xi,t) \tag{1.4}$$

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

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

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

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

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:

$$X_1 = T, \quad X_2 = \xi, \quad X_3 = Q \tag{1.7}$$

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

$$\frac{\partial h(x,t)}{\partial t} = -\int\limits_{\{X\}} F\left(\mathcal{P}(x,t;X),V,X_1\right)\rho(X,t)dX \tag{1.8}$$

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]:

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

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

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

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

$$h(x,0) = h_0 \tag{1.11}$$

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.

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

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

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

$$Q = R_a \int\limits_{-a(t)}^{a(t)} p(x,t)\cos x\, dx \tag{1.14}$$

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]

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

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:

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

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]:

$$R_i(T) = R_{i0}(1 + k_i \theta), \quad R_{i\,0} = R_i(T_0), \quad i = a, b \tag{2.3}$$

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

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

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

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

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-

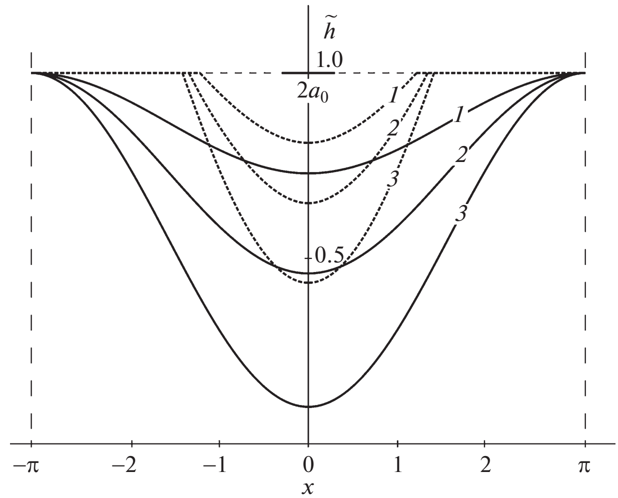

Рис. 2. Профили изношенного покрытия в различные моменты времени $\tilde{t}$: 8.03 (*1*), 16.1 (*2*), 26.8 (*3*) (стохастическая постановка задачи, $A_\xi = 1$). Штриховыми линиями показаны профили изношенного покрытия в те же моменты времени при детерминированной постановке задачи.

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 $\tilde{t} = t/t_c$, $t_c = 10^5$ с ≈ 27.8 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 “c”, а случайный – символом “r”. Для сравнения в таблице указана дол-

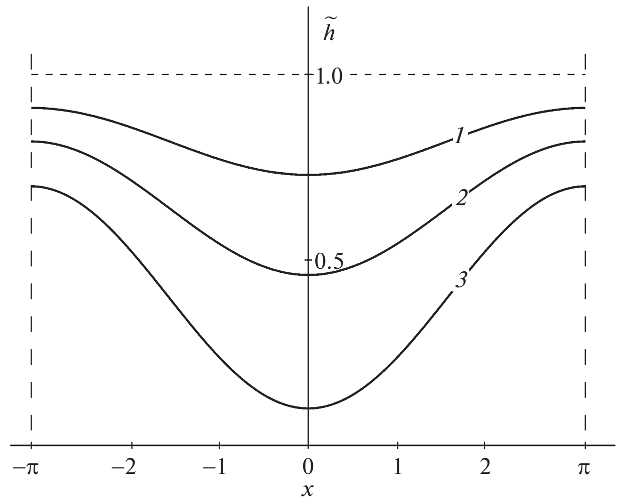

Рис. 3. Профили изношенного покрытия в различные моменты времени $\tilde{t}$: 10.7 (*1*), 21.4 (*2*), 35.8 (*3*) (стохастическая постановка задачи, $A_\xi = 2$).

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	c	r	r	100.44	133.93
2	r	r	c	29.82	39.75
3	r	r	r	29.85	39.80
4	c	c	c	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.* Износоконтактная 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. *Броновец 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., Броновец 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.