

**Арзыматов Б. М,**  
преподаватель, специалист по инновациям  
ИГУ им. К. Тыныстанова  
г. Каракол, Кыргызская Республика e-mail:  
Arzymatov\_bolot@mail.ru

**Арзыматов Б. М,**  
окутуучу, инновация боюнча адис  
К.Тыныстанов атындагы ЫМУ Каракол ш.,  
Кыргыз Республикасы e-mail:  
Arzymatov\_bolot@mail.ru

**Arzymatov B. M,**  
teacher, innovation specialist  
K.Tynystanov Issyk-Kul State University,  
Karakol, Kyrgyz Republic e-mail:  
Arzymatov\_bolot@mail.ru

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ КОНТАКТНОГО МАССАПЕРЕНОСА ПОКРЫТИЙ НА ВАКУУМНЫХ ПОДШИПНИКАХ В MATLAB**

### **КОНТАКТТЫК МАССА ӨТКӨРҮҮ ЫКМАСЫ МЕНЕН АЛЫНГАН ВАКУУМДУК ПОДШИПНИКТЕРДЕГИ КАПТАМАЛАРДЫН ДИФфуЗИЯЛЫК ПРОЦЕССТЕРИН MATLABДА МОДЕЛДӨӨ**

### **MODELING OF DIFFUSION PROCESSES OF CONTACT MASS TRANSFER OF COATINGS ON VACUUM BEARINGS IN MATLAB**

---

**Аннотация:** в статье рассматривается моделирование диффузионных процессов контактного массопереноса твёрдосмазочных покрытий на вакуумных подшипниках с использованием MATLAB. Приведены основные параметры, формулы и этапы моделирования, а также анализ влияния частоты колебаний на равномерность и скорость распределения покрытия. Полученные результаты позволяют оптимизировать технологические режимы нанесения покрытий для повышения долговечности вакуумных механизмов.

**Ключевые слова:** вакуум, подшипник, покрытие, диффузия, моделирование, MATLAB, массоперенос.

**Аннотациясы:** Макалада MATLAB программасынын жардамы менен ваакуумдук подшипниктердеги катуу майлоочу каптамалардын контакттык масса алмашуу диффузиялык процесстерин моделдөө каралат. Моделдөөнүн негизги параметрлери, формулалары жана этаптары көрсөтүлүп, термелүүнүн жыштыгынын каптаманын бир калыпта жана ылдамдыкта таралышына тийгизген таасири талданган. Алынган натыйжалар вакуумдук механизмдердин иш мөөнөтүн узартуу үчүн каптамаларды жасабуунун технологиялык режимдерин оптималдаштырууга мүмкүндүк берет.

**Негизги сөздөр:** вакуум, подшипник, каптама, диффузия, моделдөө, MATLAB, масса алмашуу.

**Abstract:** The article examines the modeling of diffusion processes of contact mass transfer of solid lubricant coatings on vacuum bearings using MATLAB. The main parameters, formulas, and stages of modeling are presented, as well as an analysis of the influence of oscillation frequency on the uniformity and rate of coating distribution. The obtained results make it possible to optimize the technological modes of coating application to increase the durability of vacuum mechanisms.

**Keywords:** vacuum, bearing, coating, diffusion, modeling, MATLAB, mass transfer.

Работа в условиях вакуума предъявляет высокие требования к узлам трения, которые должны обеспечивать надежность, долговечность и низкий коэффициент трения. Основные проблемы, возникающие при работе механизмов в вакууме, включают [2]:

1. Испарение традиционных смазочных материалов: в условиях вакуума традиционные жидкие и консистентные смазки быстро испаряются, что делает их использование невозможным.
2. Повышенная активность поверхностей: вакуумная среда способствует восстановлению окисных плёнок и десорбции газов, что увеличивает вероятность адгезионного взаимодействия контактных поверхностей. Это приводит к схватыванию и повышенному износу.
3. Отсутствие конвективного теплоотвода: вакуум исключает конвективный теплообмен, что способствует перегреву взаимодействующих поверхностей трения.
4. Необходимость обеспечения "экологической чистоты": Современные вакуумные технологии требуют минимального газовыделения и низкой генерации частиц износа.

Для решения этих проблем широко применяются твёрдосмазочные покрытия (ТСП), которые:

- Снижают коэффициент трения и износ поверхностей.
- Обеспечивают устойчивую работу узлов трения в экстремальных условиях.
- Увеличивают долговечность механизмов.

ТСП находят применение в аэрокосмической отрасли, вакуумной электронике, приборах высокой точности и других областях [3]. Однако эффективное использование таких покрытий требует решения ряда задач:

- Разработка методов их нанесения, обеспечивающих высокую адгезию и равномерность.
- Оптимизация толщины и состава покрытий для различных условий эксплуатации.
- Моделирование трибологических процессов для прогнозирования поведения покрытий в вакууме.

Целью исследования было моделирование процесса контактного массопереноса покрытий на вакуумных подшипниках и обоснование выбора технологических режимов метода контактного массопереноса (МКМ) твёрдосмазочных покрытий для эффективного применения в механизмах, работающих в вакууме. Основной задачей работы было обоснование технологической схемы и выбора режимов МКМ твёрдосмазочных покрытий на детали подшипников качения, провести оптимизацию параметров нанесения покрытий на основе данных моделирования и экспериментальных исследований [5, С. 216-222].

Новизна исследования заключается в применении метода контактного массопереноса для нанесения ТСП на детали вакуумных подшипников, разработке моделей, учитывающих тепловые, динамические и механические параметры систем трения. Также в использовании MATLAB для комплексного анализа трибологических процессов.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке вакуумных механизмов в различных отраслях. Предложенные методы нанесения ТСП обеспечивают улучшение долговечности и эффективности работы узлов трения, что особенно важно для механизмов, работающих в вакууме. Анализ результатов моделирования с применением искусственного интеллекта, представленных в MATLAB, показал высокую перспективность применения ТСП для вакуумных механизмов. Разработанные модели дают возможность прогнозировать поведение покрытий при различных режимах работы, что делает их применение более точным и экономически обоснованным. Дополнительно моделирование подтвердило, что выбор оптимальных параметров нанесения покрытия может значительно улучшить эксплуатационные характеристики.

Выполним расчёт усилия  $P$  в зависимости от амплитуды и скорости для двух различных масс шариков ( $M_1=0.002$  кг и  $M_2=0.015$  кг), а затем визуализируем эти зависимости на графиках.

#### Исходные параметры системы

- диаметр контактной области  $d \approx 0,28 \text{ мм} \approx 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .
- амплитуды  $A_1=2 \text{ мм}$ ,  $A_2=3 \text{ мм}$ ,  $A_3=5 \text{ мм}$ ,  $A_4=7 \text{ мм}$ .
- массы ударного тела  $M_T^1 \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$  (для  $d_T^1 \approx 8 \text{ мм}$ ),  $M_T^2 \approx 15,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$  (для сферического шара  $d_T^1 \approx 15,6 \text{ мм}$ ).
- модули упругости материалов и коэффициенты Пуассона:  $E_M^{Pb} \approx 1,7 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ ,  $E_T^{CT} \approx 2,6 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ,  $\nu_M^{Pb} \approx 0,43$ ,  $\nu_T^{CT} \approx 0,23$
- Скорости (м/с):  $V = [0.31, 0.47, 0.78, 1.1] \text{ м/с}$ .

#### Формула для расчёта усилия $P$

Усилие рассчитывается по формуле 1.:

$$P \approx \sqrt{\frac{5}{6} \cdot \frac{M_1 \cdot V_1^2 \cdot d}{\frac{1 - \nu_M^2}{E_M} + \frac{1 - \nu_T^2}{E_T}}} \quad (1)$$

#### Основной расчёт

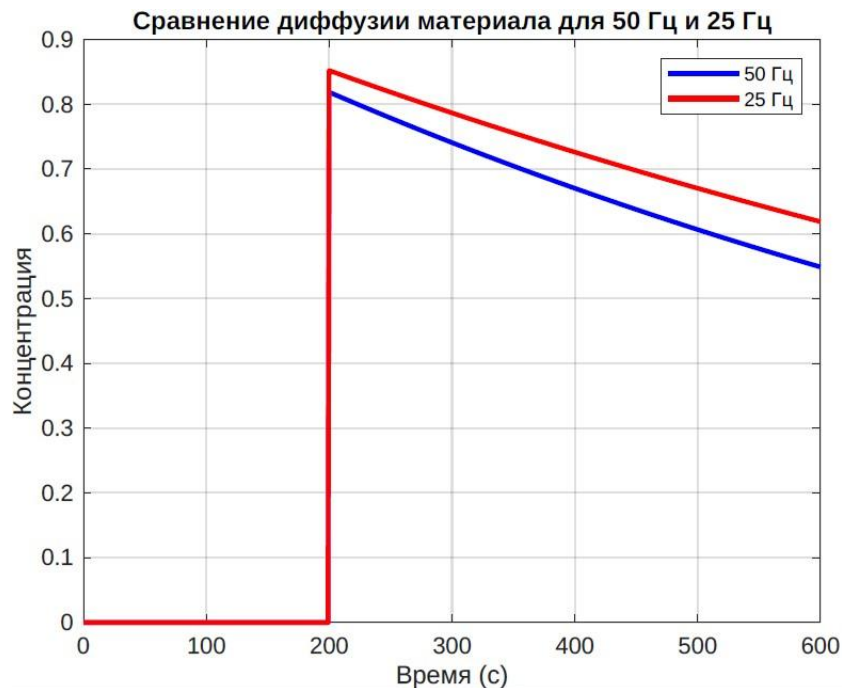
Усилия  $P_1$  и  $P_2$  вычисляются для всех скоростей  $V$  и двух масс  $M_1$  и  $M_2$ : for  $i = 1:\text{length}(V)$

```
P1(i) = sqrt((5/6) * (M1 * V(i)^2 * d) / ...
((1 - nu_M_Pb^2) / E_M_Pb + (1 - nu_T_CT^2) / E_T_CT));    P2(i) =
sqrt((5/6) * (M2 * V(i)^2 * d) / ...
((1 - nu_M_Pb^2) / E_M_Pb + (1 - nu_T_CT^2) / E_T_CT)); end
```

Усилия  $P_1$  и  $P_2$  зависят от массы шарика ( $M_1, M_2$ ) и скорости  $V$ . Чем больше масса и скорость, тем выше значение усилия. Также выполним моделирование диффузии материала при тех же исходных параметрах системы в MATLAB. [1, с 299–307]

График (см. рис.1) отображает зависимость концентрации материала от времени при моделировании диффузии. График показывает:

- Концентрация материала убывает со временем. Это отражает процесс диффузии, где частицы материала постепенно распределяются в пространстве, уменьшая свою локальную концентрацию.
- Экспоненциальный характер убывания концентрации соответствует стандартной модели диффузии с поправкой на частоту колебаний.



**Рис.1** Зависимость концентрации материала от времени.

Этапы графика:

- Начальный этап ( $t = 0-200$  с): Быстрое падение концентрации. В этот момент система активно перераспределяет материал из-за высокой скорости диффузии.
- Средний этап ( $t = 200-400$  с): Замедление убывания концентрации. Это связано с тем, что материал начинает равномерно распределяться, и процесс стабилизируется.
- Финальный этап ( $t > 400$  с): Концентрация материала почти не изменяется, что указывает на близкое к равновесному состояние.

Роль частоты в графике:

В модели частота влияет на скорость диффузии через поправочный коэффициент. При 50 Гц (стандартной настройке) концентрация убывает быстрее, так как более частые колебания усиливают процессы переноса материала.

Практическое значение:

График помогает понять, как быстро покрытие будет распространяться и стабилизироваться на поверхности подшипника. Эта информация может быть использована для оптимизации времени нанесения покрытия и оценки его равномерности. После анализа графика диффузий при 25 Гц и сравнения с графиком при 50 Гц, можно выделить следующие отличия:

1. Скорость убывания концентрации:

При 25 Гц график показывает замедленное снижение концентрации материала в сравнении с 50 Гц. Это связано с уменьшением поправочного коэффициента

(frequency\_factor = 0.8 для 25 Гц против 1.0 для 50 Гц), что снижает скорость диффузии.

## 2. Общее поведение:

При 25 Гц концентрация материала остаётся выше в течение всего процесса.

Экспоненциальный характер убывания сохраняется, но к концу моделирования ( $t \approx 600$  с) концентрация не достигает тех низких значений, которые наблюдались при 50 Гц.

## 3. Физический смысл изменений:

Более низкая частота колебаний (25 Гц) означает меньшую интенсивность движения частиц, что замедляет перераспределение материала. Это может быть полезно, если требуется сохранить покрытие на определённой области дольше.

В коде используется численное моделирование процесса диффузии, а также распределения концентрации материала:

```
% Параметры диффузии
D = 1e-9; % коэффициент диффузии (м^2/с) particle_diameter = 0.001;
% диаметр частицы (м)

% Временные параметры
t_end = 600; % общее время моделирования (с) (10 минут) dt = 0.001;
% шаг времени (с)
t = 0:dt:t_end; % массив времени

% Инициализация массивов для 50 Гц material_concentration_50Hz =
zeros(size(t));

% Моделирование для 50 Гц
for i = 2:length(t)    if t(i) <=
t_end/3
    A = 0.001; % минимальная амплитуда    elseif t(i) <=
2*t_end/3
    A = 0.004; % средняя амплитуда    else
    A = 0.008; % высокая амплитуда    end

    if A > A2
        frequency_factor = 1.0; % поправочный коэффициент для 50 Гц
        diffusion_rate = (D / particle_diameter^2) * frequency_factor;
        material_concentration_50Hz(i) = exp(-diffusion_rate * t(i));    end
% Инициализация массивов для 25 Гц material_concentration_25Hz =
zeros(size(t));
% Моделирование для 25 Гц
for i = 2:length(t)    if t(i) <=
t_end/3
    A = 0.001; % минимальная амплитуда    elseif t(i) <=
2*t_end/3
    A = 0.004; % средняя амплитуда    else
    A = 0.008; % высокая амплитуда    end

    if A > A2
```

```
frequency_factor = 0.8; % поправочный коэффициент для 25 Гц
diffusion_rate = (D / particle_diameter^2) * frequency_factor;
material_concentration_25Hz(i) = exp(-diffusion_rate * t(i)); end
```

Формулы, которые применяются в модели:

1. Формула диффузии (основное уравнение):

Для одномерного случая диффузия описывается уравнением теплопроводности (или уравнением Фика для диффузии):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (2) \text{ где:}$$

$C(x, t)$  – концентрация материала в зависимости от координаты  $x$  и времени  $t$ ,  
 $D$  – коэффициент диффузии ( $\text{м}^2/\text{с}$ ),

$\frac{\partial C}{\partial t}$

– производная концентрации по времени,  $\frac{\partial C}{\partial t}$

$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$

–

$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$  – вторая производная концентрации по пространству.

2. Численное решение уравнения диффузии:

Используется метод конечных разностей для аппроксимации производных:

$$C_{i,n+1} - C_{i,n} = \frac{D}{\Delta x^2} \Delta t (C_{i+1,n} - 2C_{i,n} + C_{i-1,n}), \quad (3) \text{ где:}$$

$C_{i,n}$  – концентрация в узле  $i$  на шаге времени  $n$ ,

$\Delta t$  – шаг по времени,

$\Delta x$  – шаг по пространству,

$C_{i,n+1}$  – концентрация в узле  $i$  на следующем временном шаге.

3. Экспоненциальное распределение концентрации:

В коде используется упрощённая формула для концентрации материала с учётом времени и поправочного коэффициента:

$$C(t) = \exp\left(-\frac{D}{\text{particle\_diameter}^2} \cdot \text{frequency\_factor} \cdot t\right), \quad (4) \text{ где:}$$

$D$  – коэффициент диффузии,

$\text{frequency\_factor}$  – поправочный коэффициент, зависящий от частоты (1.0 для 50 Гц и

0.8 для 25 Гц),  $d$  – диаметр частицы,  $t$  – время.

Метод конечных разностей используется для численного решения уравнения диффузии, описывая, как концентрация изменяется по времени и пространству. Экспоненциальное распределение в коде отражает упрощённую модель убывания концентрации со временем, что позволяет быстрее оценивать результат.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ito K, Yoneyama S, Yoneyama S, Fons P, Noda K. CVD Grown Sub 10 nm Size g-C<sub>3</sub> N<sub>4</sub> Particle-Decorated TiO<sub>2</sub> Nanotube Array Composites for Enhanced Photocatalytic H<sub>2</sub> Production. ACS Mater Au. 12 март 2025 г.;5(2): -299–307.
2. Arzymatov B, Deulin E. Solid lubricant mass contact transfer technology usage for vacuum ball bearings longevity increasing. J Phys: -Conf Ser. июль 2016 г.;729(1).
3. Seynstahl A, Krauß S, Bitzek E, Meyer B, Merle B, Tremmel S. Microstructure, Mechanical Properties and Tribological Behavior of Magnetron-Sputtered MoS<sub>2</sub> Solid Lubricant Coatings Deposited under Industrial Conditions. Coatings. 15 апрель 2021 г.;11(4).
4. Gokce B, Geren N, Izciler M. Effect of substrate surface roughness on the wear of molybdenum disulphate coated rolling contact bearings. Materialpruefung/Materials Testing. 2021 г.;63(9). -848–54.
5. Долговечность вакуумных подшипников с нанесёнными твёрдосмазочными покрытиями методом контактного массопереноса. Арзыматов Б.М. Вестник Исык Кульского университета. 2024. № 56. С. 216-222.
6. Исследование долговечности твёрдосмазочных покрытий на деталях вакуумных подшипников, нанесенных методом контактного массопереноса. Кабаева Г.Дж., Арзыматов Б.М. Известия Кыргызского государственного технического университета им . И. Раззакова. - 2023. - № 3 (67). - С. 1541-1548.