

УДК 621.891:519.28

doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-127-134

Оценка ресурса пар трения с твердосмазочными покрытиями при реверсивном движении в условиях вакуума

П.Н. Хопин

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Evaluation of the friction pairs service life with solid lubricant coatings at the reverse motion in the vacuum conditions

P.N. Khopin

Moscow Aviation Institute (National Research University)

Выполнена оценка поверхностной температуры трения и ресурса пар трения вал — втулка с твердосмазочным покрытием на основе MoS_2 с фенольным связующим, нанесенным суспензионным методом, при реверсивном движении для заданных нагрузочно-скоростных условий трения в условиях вакуума. Определена термокорреляционная зависимость ресурса пары трения с таким твердосмазочным покрытием от поверхностной температуры трения при реверсивном движении в условиях вакуума. Показано, что для условий вакуума и поверхностной температуры трения менее 15°C ресурс пар трения при реверсивном скольжении больше, чем при чистом, а для поверхностной температуры трения более 15°C ресурс пар трения реверсивного скольжения в 1,4–2,4 раза меньше, чем у фрикционных сопряжений трения скольжения. Разработан алгоритм расчета ресурса пар трения с твердосмазочным покрытием реверсивного скольжения для условий вакуума.

Ключевые слова: твердосмазочные покрытия, суспензионное нанесение, реверсивное движение, триботехнические характеристики, условия вакуума

Surface friction temperatures and service life of the friction pairs of the shaft-reverse motion sleeve with the solid lubricant slurry coating based on the MoS_2 with phenolic binders were evaluated for the given load-speed friction conditions in vacuum. Thermocorrelation dependence of the SLC service life of the type under consideration on the surface friction temperature at reverse friction in vacuum was determined. It is shown that the service life of the reverse sliding friction pairs with the solid lubricant coating based on the MoS_2 with phenolic binder up to surface friction temperatures of less than 15°C in vacuum is higher than that of similar friction pairs of pure sliding. For surface friction temperatures of more than 15°C , the reverse sliding pairs' service life was by 1.4–2.4 times less than that of similar sliding friction pairs. A sequence for calculating the service life of the considered friction pairs with SLC of reverse sliding in vacuum was developed.

Keywords: solid lubricant coatings, suspension application, reverse motion, tribotechnical characteristics, vacuum conditions

Твердосмазочные покрытия (ТСП) на основе MoS_2 со связующими веществами суспензионного нанесения получили широкое распространение в узлах трения, работающих в условиях вакуума [1–8], и в механизмах, исключающих использование масел и консистентных смазок из-за их испаряемости, неудовлетворительной работоспособности при высоком контактом давлении и низкой скорости скольжения, существенных перепадах температур и др.

Указанные фрикционные сопряжения функционируют автономно, не требуя сложных систем смазки. К ним относятся твердые смазочные материалы, такие как MoS_2 , нанесенные суспензионным, магнетронным или высокочастотным методами, а также металли-

ческие покрытия с низким сдвигом, твердые покрытия и композиционные материалы [9, 10].

Примеры применения ТСП на основе MoS_2 в механизмах космических аппаратов разного типа приведены в табл. 1 [11]. Как следует из таблицы, во многих механизмах космических аппаратов применяют ТСП на основе MoS_2 со связующими веществами (смолами).

Анализ литературы показал, что большая часть исследований триботехнических характеристик рассматриваемых сопряжений с ТСП выполнена для скользящего контакта, в то время как многие фрикционные сопряжения периодически работают в условиях реверсивного движения.

Таблица 1

Примеры применения ТСП на основе MoS_2 в механизмах космических аппаратов разного типа

Механизм	Назначение	Примечание	Тип ТСП
Устройство для измерения инерционных свойств	Контроль ориентации	Требует постоянного многократного прохождения с низким коэффициентом трения	Со связующим
Пусковой зажим для первичного датчика	Снятие пусковой нагрузки с подшипников	Единичный сбой в основной миссии	То же
Скользящие кольца для микроволнового датчика	Передача мощности и сигнала через вращающийся контакт	Чрезмерный шум ухудшает производительность датчика	Композиционное
Подшипники приводного механизма солнечной батареи (ПМСБ)	Поддержка механической сборки конструкции привода солнечной батареи	Обеспечивает отслеживание солнца для получения энергии	Со связующим
Скользящие кольца для ПМСБ	Передача мощности и сигнала	Чувствительность к шуму для звездного трекера	Композиционное
	Передача сигнала	Чувствительность к шуму	То же
Основные подшипники погодных датчиков	Сканирование карты погоды	Чувствительность к ударам крутящего момента	Напыленное
Кормовые опорные подшипники для интерфейса орбитального аппарата	Обеспечение опоры для запуска с орбитального аппарата	Несколько сред, повторное использование	Со связующим
Карданные подшипники, пружины с защитой от люфта, домкратные винты	Поворот и управление антеннами	Чувствительное наведение	Напыленное, со связующим
Подшипники ПМСБ	Поддержка механической сборки конструкции привода солнечной батареи	Работа при низкой температуре	То же
Карданные пружины, домкратные винты, шарикоподшипники, гнезда, шестерни	Управление движением, освобождение люльки	Чувствительное наведение	»
Втулки, пружины, шестерни, зажимы и т. д.	Приостановление, разделение деталей	Единичные отказы и точечный износ	Полученное натиранием, со связующим
Выравнивающие (расцепляющие) штифты	Поддержка антенны с высоким коэффициентом усиления в сложенном виде		Со связующим

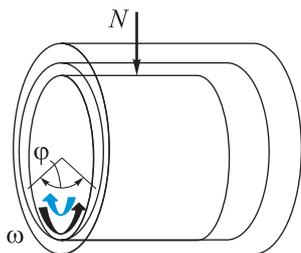


Рис. 1. Схема возвратно-вращательного движения пары трения вал — втулка с ТСП на основе MoS₂ с фенольным связующим при реверсивных трибологических испытаниях в вакууме

Цель исследования — разработка математического аппарата для оценки триботехнических характеристик пар трения с ТСП на основе MoS₂ со связующим составляющим, функционирующих в условиях вакуума, при реверсивном движении.

Материалы и инструменты. В результате обзора литературных источников выявлены экспериментальные исследования возвратно-вращательного скольжения пары трения вал — втулка с ТСП на основе MoS₂ с фенольным связующим, проведенные в условиях вакуума и нормальной атмосферы [12].

Схема возвратно-вращательного движения пары трения вал — втулка с ТСП на основе MoS₂ с фенольным связующим при реверсивных трибологических испытаниях в вакууме приведена на рис. 1.

Исследовали ТСП, содержащее около 25 % по массе MoS₂ и связующее из фенольной смолы, нанесенное на внутренний диаметр втулки и наружный диаметр вала распылением и термоотвержденное при 150 °С в течение 1 ч. Толщина ТСП составляла около 10 мкм. Характеристики трения и износостойкости исследовали при различных значениях нагрузки и скорости скольжения в условиях вакуума ($p_v = 10^{-5}$ Па).

В качестве материала вала использовали закаленную коррозионно-стойкую сталь JIS 630 высокой прочности [12]. Диаметр подшипника составлял 10 мм, его ширина — 7 мм, зазор в подшипнике — около 20 мкм [12]. Условия и результаты испытаний рассматриваемой пары трения приведены в табл. 2. Там же указаны результаты испытаний — значения скорости скольжения v и ресурса пары трения, рассчитанные с учетом заданных условий испытаний.

Обсуждение результатов. Анализ результатов испытаний ТСП (см. табл. 2), показал, что в опытах № 2 и 9 получены одинаковые значения контактного давления p , скорости скольжения v и ресурса ТСП, выраженного в количестве колебаний W . Это свидетельствует о том, что угол колебаний, который в этих опытах составил соответственно 50 и 300° не влияет на ресурс пары трения с ТСП при реверсивном движении в рассматриваемых условиях трения. Поэтому в дальнейшем расчет поверхностной температуры трения $T_{тр}$, зависящий от нагрузочно-скоростных условий трения, проводили только для опыта № 2.

Оценка поверхностной температуры трения результатов реверсивных испытаний пар с ТСП. Согласно методике, предложенной в работах [13, 14], для оценки ресурса пары трения с ТСП необходимо рассчитать поверхностную температуру трения $T_{тр}$ с помощью зависимости $T_{тр} = f(p, v)$, полученной для условий вакуума ($p_v = 4$ мПа) и диапазонов $p = 61...121$ МПа и $v = 0,087...0,504$ м/с:

$$T_{тр} = 3,31 + 291,64v + 0,643p - 282,19v^2, \text{ °C.} \quad (1)$$

Температуру трения непрерывно измеряли в процессе экспериментов с помощью термопары, закрепленной в непосредственной близости от места контакта в отверстии контробразца,

Таблица 2

Условия и результаты испытаний рассматриваемой пары трения в вакууме

Номер опыта	Нагрузка N, Н	Контактное давление p , МПа	Угол колебаний φ , град	Угловая скорость ω , град/с	Коэффициент трения $f_{тр}$	Количество колебаний W	Скорость скольжения v , м/с
1	5880	84	50	50	0,05	80 000	0,004360
2	1960	28	50	50	0,05	90 000	0,004360
3	980	14	50	50	0,05	500 000	0,004360
7	5880	84	50	5	0,05	80 000	0,000436
9	1960	28	300	50	0,05	90 000	0,004360

с последующей тарировкой, используя наружную термопару при имитации нагрева зоны контакта. Пересчет в поверхностную температуру трения $T_{тр}$ проводили с помощью тарировочной зависимости.

Очевидно, что режимы трения при испытаниях пар с ТСП на установке Н. Хираоки ($v = 0,00436 \dots 0,000436$ м/с, $p = 14 \dots 84$ МПа) выходят по контактному давлению за диапазоны указанных факторов, использованные при получении формулы (1).

В связи с этим был проведен пересчет средней поверхностной температуры трения применительно к условиям трения пары с ТСП с корректировкой результата по схеме, приведенной на рис. 2.

Корректировку выполняли в два этапа. Первый этап — расчет для ординат точек (т.) А, Б, К при основном уровне фактора $p = 91$ МПа; для т. И, соответствующей условию $v = 0$ м/с, поверхностная температура трения $T_{тр}$ принята равной 15 °С; построение кривой АВКЕИ.

Второй этап корректировки — построение кривой ЛЕЗ в следующей последовательности: расчет уравнения кривой БВГ для основного уровня фактора $v = 0,295$ м/с; переход к кривой ЛЕЗ, осуществляемый за счет снижения ординат точек кривой на величину понижения ординаты т. В до т. Е; построение искомой кривой ЛЕДЗ; расчет с помощью полученного уравнения ординат (соответствующих $T_{тр}$) т. Н, М и О, соответствующих условиям опытов № 1, 2 и 3 (см. табл. 2).

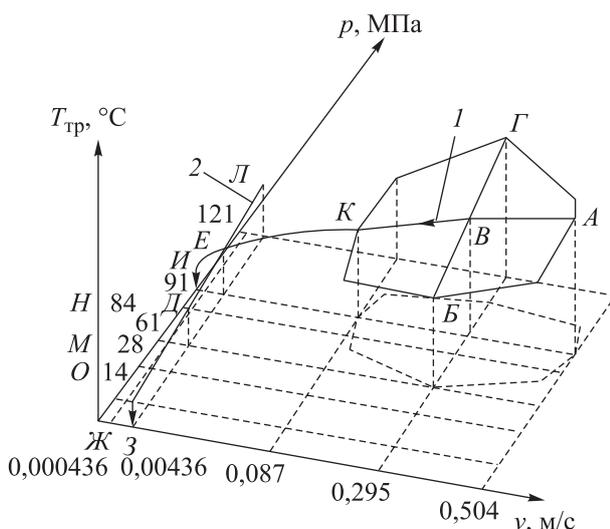


Рис. 2. Схема первого (1) и второго (2) этапов корректировки поверхностной температуры трения $T_{тр}$ для условий испытаний пары трения с ТСП

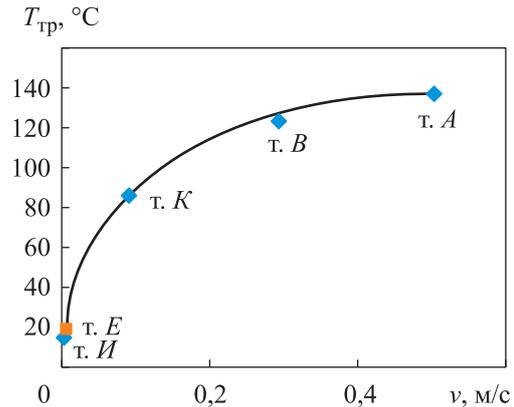


Рис. 3. Схема расчета поверхностной температуры трения $T_{тр}$ для т. Е на первом этапе корректировки:

- ◆ и — — расчетные данные для построения кривой АВКЕИ и кривая АВКЕИ;
- — $T_{тр}$ для т. Е при $v = 0,00436$ м/с

Результаты первого этапа корректировки приведены на рис. 3. Уравнение кривой АВКЕИ адекватно описывается зависимостью

$$T_{тр} = 3632v^3 - 3495v^2 + 1081v + 15. \quad (2)$$

Поверхностная температура трения $T_{тр}$ для искомой т. Е при $v = 0,00436$ м/с, рассчитанная по выражению (2) составила $19,65$ °С.

На втором этапе корректировки сначала проводили расчет уравнения кривой БВГ для основного уровня фактора $v = 0,295$ м/с, которое имело вид

$$T_{тр} = 0,643p + 64,75.$$

Затем выполняли переход к кривой ЛЕЗ путем снижения ординат точек кривой на величину понижения ординаты т. В до т. Е. Для т. З, соответствующей условию $p = 0$ МПа, значение $T_{тр}$ принимали равным 15 °С. Уравнение кривой ЛЕЗ описывается зависимостью (рис. 4)

$$T_{тр} = 14,012e^{0,0067p}. \quad (3)$$

С помощью выражения (3) рассчитывали ординаты (соответствующие температуре трения $T_{тр}$) т. Н (опыт № 1), т. М (опыт № 2) и т. О (опыт № 3), для которых контактное давление составляло соответственно 84 , 28 и 14 МПа (см. табл. 2) при скорости скольжения $v = 0,00436$ м/с. Для условий опыта № 7 ($p = 84$ МПа и $v = 0,000436$ м/с) $T_{тр} = 5$ °С.

Расчетные значения поверхностной температуры трения $T_{тр}$ и ресурса рассматриваемой пары трения для условий опытов № 1–3, 7 и 9 приведены в табл. 3.

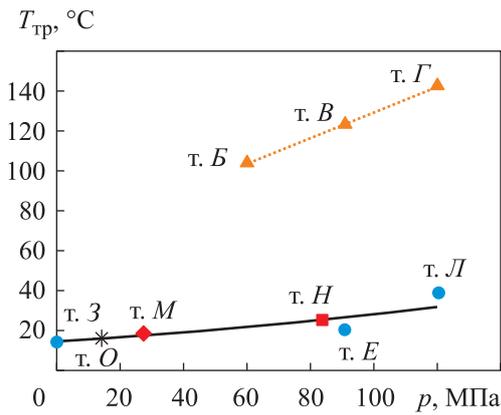


Рис. 4. Схема расчета поверхностной температуры трения $T_{тр}$ для т. E на втором этапе корректировки при скорости скольжения $v = 0,00436$ м/с:

- и ▲ — расчетные данные для построения кривых ЛЕЗ и БВГ; — — экспоненциальная кривая ЛЕЗ;
- ⋯ — кривая БВГ; ■ — $T_{тр}$ в т. H (опыт № 1);
- ◆ — $T_{тр}$ в т. M (опыт № 2); * — $T_{тр}$ в т. O (опыт № 3)

Таблица 3

Расчетные значения поверхностной температуры трения и ресурса рассматриваемой пары трения

Номер опыта	$T_{тр}, °C$	Ресурс τ , мин
1	24,6	1333
2	16,9	1500
3	15,4	8333
7	15,0	13 333
9	16,9	9000

Сравнительный анализ ресурса пары трения при реверсивном и чистом скольжении в условиях вакуума. Зависимости ресурса пары трения с ТСП на основе MoS_2 с фенольным связующим [12] от поверхностной температуры трения $T_{тр}$ при реверсивном движении, построенные с использованием данных табл. 3, приведены на рис. 5. Там же показаны экспериментальные данные и зависимость $\tau = f(T_{тр})$ для пары трения скольжения с ТСП ВНИИ НП 212 в вакууме [15].

Расчетная зависимость ресурса пары трения реверсивного движения от поверхностной температуры трения $T_{тр}$ принимает вид

$$\tau_{рев} = -555T_{тр}^3 + 31754T_{тр}^2 - 593040T_{тр} + 3637788. \quad (4)$$

Для оценки ресурса пары трения с ТСП реверсивного движения на основе экспериментальных исследований, полученных при трении скольжения, ранее для условий нормальной атмосферы был предложен коэффициент снижения ресурса [15]

$$K_{сн} = \tau_{ск} / \tau_{рев}, \quad (5)$$

где $\tau_{ск}$ — ресурс пары при трении скольжения; $\tau_{рев}$ — ресурс пары трения при реверсивном движении.

Для условий вакуума применительно к ТСП рассматриваемого типа и диапазонам нагрузочно-скоростных условий трения можно использовать аналогичный параметр, значение которого изменяется в зависимости от поверхностной температуры трения $T_{тр}$. Значения ресурса пары трения реверсивного движения и коэффициента снижения ресурса пар трения с ТСП при переходе от трения скольжения к реверсивному движению, полученные путем расчета по формулам (4) и (5), приведены в табл. 4.

Следует отметить, коэффициент $K_{сн}$ рассчитывали, исходя из предположения, что триботехнические характеристики ТСП на основе MoS_2 с фенольным связующим близки к таковым для ТСП с мочевино-формальдегидным связующим (ТСП ВНИИ НП 212).

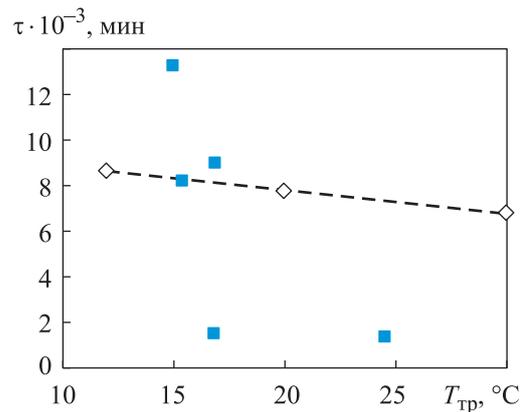


Рис. 5. Зависимости ресурса τ пары трения с ТСП от поверхностной температуры трения $T_{тр}$ при реверсивном движении в условиях вакуума:

- — экспериментальные данные для пары трения с ТСП на основе MoS_2 с фенольным связующим;
- ◇ и — — экспериментальные данные и зависимость $\tau = f(T_{тр})$ для пары трения скольжения с ТСП ВНИИ НП 212

Таблица 4

Расчетные значения коэффициента снижения ресурса пар с ТСП при переходе от трения скольжения к реверсивному движению

Номер опыта	$T_{тр}, °C$	$\tau_{рев}$, МИН	$\tau_{ск}$, МИН	$K_{сн}$
1	24,6	3005,160	7359,922064	2,449095
2	16,9	5792,945	8155,088744	1,407762
3	15,4	8744,120	8314,826864	0,950905
7	15,0	13713,000	8357,690000	0,609472
9	16,9	5792,945	8155,088744	1,407762

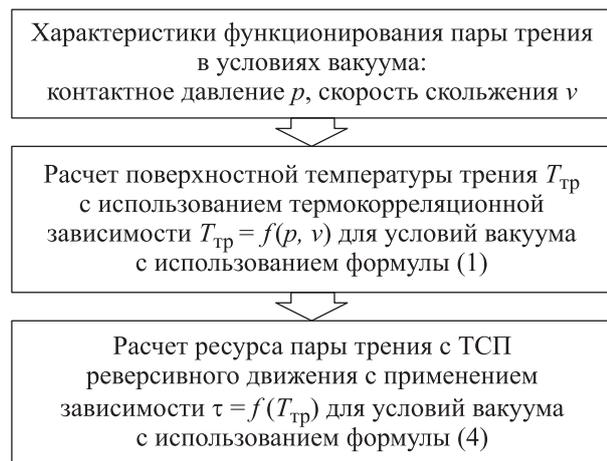


Рис. 6. Блок-схема алгоритма расчета ресурса пары трения на основе MoS₂ с фенольным связующим при реверсивном движении в условиях вакуума

Анализ данных, приведенных на рис. 5 и в табл. 4, показывает, что для условий вакуума при поверхностной температуре трения $T_{тр} < 15\text{ °C}$ ресурс пары трения с ТСП на основе MoS₂ с фенольным связующим при реверсивном скольжении больше, чем у аналогичных фрикционных сопряжений при чистом скольжении. При поверхностной температуре трения $T_{тр} > 15\text{ °C}$ ресурс пар трения реверсивного скольжения в 1,4–2,4 раза меньше, чем у аналогичных пар трения скольжения.

Для оценки ресурса пар трения с ТСП реверсивного движения на основе MoS₂ с фенольным

связующим, функционирующих в условиях вакуума, при поверхностной температуре трения $T_{тр} = 15,0...24,6\text{ °C}$ предлагается алгоритм расчета, приведенный на рис. 6.

Выводы

1. Проведена оценка поверхностной температуры трения и ресурса пар трения вал — втулка реверсивного движения с ТСП суспензионного нанесения на основе MoS₂ с фенольным связующим при заданных нагрузочно-скоростных условиях трения в условиях вакуума.

2. Определена термкорреляционная зависимость ресурса пары трения с ТСП рассматриваемого типа от поверхностной температуры трения в условиях вакуума.

3. Установлено, что в условиях вакуума при поверхностной температуре трения менее 15 °C ресурс пар трения реверсивного скольжения с ТСП на основе MoS₂ с фенольным связующим больше, чем у фрикционных сопряжений чистого скольжения. При поверхностной температуре трения более 15 °C ресурс пар трения реверсивного скольжения в 1,4–2,4 раза меньше, чем у аналогичных пар трения чистого скольжения.

4. Предложен алгоритм расчета ресурса пар трения с ТСП на основе MoS₂ при реверсивном движении в условиях вакуума.

Литература

- [1] Lince J.R. Effective application of solid lubricants in spacecraft mechanisms. *Lubricants*, 2020, vol. 8, no. 7, art. 74, doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants8070074>
- [2] Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. *Прикладная трибология (трение, износ и смазка)*. Москва, Экспресс, 2010. 604 с.
- [3] Маленков М.И., Каратушин С.И., Тарасов В.М. *Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов*. Санкт-Петербург, БГТУ, 2007. 54 с.
- [4] Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C. et al. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-based coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 2001, vol. 142–144, pp. 67–77, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01108-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01108-2)
- [5] Ярош В.М., Моишеев А.А., Броневец М.А. Исследование материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве на орбите вокруг Луны. *Трение и износ*, 2003, т. 24, № 6, с. 626–635.
- [6] Сентюрихина Л.Н., Опарин Е.М. *Твердые дисульфидмолибденовые смазки*. Москва, Химия, 1966. 152 с.
- [7] Braithwaite E.R. *Solid lubricants and surfaces*. Pergamon Press, 1964. 294 p.
- [8] Цеев Н.А., Козелкин В.В., Гуров А.А. *Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме*. Москва, Машиностроение, 1991. 192 с.
- [9] Campbell M.E. *Solid lubricants: a survey*. NASA SP-5059(01). NASA, 1972. 136 p.
- [10] Conley P.L., ed. *Space vehicle mechanisms*. Wiley, 1998.

- [11] Hilton M.R., Fleischauer P.D. Applications of solid lubricant films in spacecraft. *Surf. Coat. Technol.*, 1992, vol. 54–55, part 2, pp. 435–441, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(07\)80062-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(07)80062-4)
- [12] Hiraoka N. Wear life of bonded MoS₂ film lubricant. In: *Tribology of machine elements*. IntechOpen, 2021, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.99802>
- [13] Хопин П.Н. Оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в условиях вакуума. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2016, № 2, с. 85–90.
- [14] Хопин П.Н. Анализ испытаний пар трения с твердосмазочными покрытиями в наземно-космических условиях и прогнозирование трибологических характеристик. *Трение и износ*, 2018, т. 39, № 2, с. 175–183.
- [15] Хопин П.Н., Козлова О.В., Горбач Л.Е. Оценка долговечности пар трения с твердосмазочными покрытиями при реверсивном движении. *Трение и износ*, 2018, т. 39, № 6, с. 649–656.

References

- [1] Lince J.R. Effective application of solid lubricants in spacecraft mechanisms. *Lubricants*, 2020, vol. 8, no. 7, art. 74, doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants8070074>
- [2] Drozdov Yu.N., Yudin E.G., Belov A.I. *Prikladnaya tribologiya (trenie, iznos i smazka)* [Applied tribology (friction, wear and lubrication)]. Moscow, Ekopress Publ., 2010. 604 p. (In Russ.).
- [3] Malenkov M.I., Karatushin S.I., Tarasov V.M. *Konstruktivnye i smazochnye materialy kosmicheskikh mekhanizmov* [Construction and lubrication materials of space mechanisms]. Sankt-Petersburg, BGTU Publ., 2007. 54 p. (In Russ.).
- [4] Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C. et al. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-based coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 2001, vol. 142–144, pp. 67–77, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01108-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01108-2)
- [5] Yarosh V.M., Moishev A.A., Bronovets M.A. Friction and wear study of materials in open space on an orbit around the Moon. *Trenie i iznos*, 2003, vol. 24, no. 6, pp. 626–635. (In Russ.).
- [6] Sentyurikhina L.N., Oparin E.M. *Tverdye disulfidmolibdenovye smazki* [Solid disulphide molybdenum lubricants]. Moscow, Khimiya Publ., 1966. 152 p. (In Russ.).
- [7] Braithwaite E.R. *Solid lubricants and surfaces*. Pergamon Press Publ., 1964. 294 p.
- [8] Tseev N.A., Kozelkin V.V., Gurov A.A. *Materialy dlya uzlov sukhogo treniya, rabotayushchikh v vakuume* [Materials for dry friction units operating in vacuum]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 192 p. (In Russ.).
- [9] Campbell M.E. *Solid lubricants: a survey*. NASA SP-5059(01). NASA, 1972. 136 p.
- [10] Conley P.L., ed. *Space vehicle mechanisms*. Wiley, 1998.
- [11] Hilton M.R., Fleischauer P.D. Applications of solid lubricant films in spacecraft. *Surf. Coat. Technol.*, 1992, vol. 54–55, part 2, pp. 435–441, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(07\)80062-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(07)80062-4)
- [12] Hiraoka N. Wear life of bonded MoS₂ film lubricant. In: *Tribology of machine elements*. IntechOpen, 2021, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.99802>
- [13] Khopin P.N. Assessment of operability of couples of friction with solid lubricating coverings in vacuum conditions. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2016, no. 2, pp. 85–90. (In Russ.).
- [14] Khopin P.N. Test analysis of friction couples with solid lubricant coatings under ground-space conditions and prediction of tribological characteristics. *Trenie i iznos*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 175–183. (In Russ.). (Eng. version: *J. Frict. Wear*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 137–144, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366618020071>)
- [15] Khopin P.N., Kozlova O.V., Gorbach L.E. Durability evaluation for friction pairs with solid lubrication coatings under reverse motion. *Trenie i iznos*, 2018, vol. 39, no. 6, pp. 649–656. (In Russ.). (Eng. version: *J. Frict. Wear*, 2018, vol. 39, no. 6, pp. 505–511, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366618060053>)

Информация об авторе

ХОПИН Петр Николаевич — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология испытаний и эксплуатации». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: chopinp@mail.ru).

Information about the author

KHOPIN Peter Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Department Technology of testing and operation. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: chopinp@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хопин П.Н. Оценка ресурса пар трения с твердосмазочными покрытиями при реверсивном движении в условиях вакуума. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 9, с. 127–134, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-127-134

Please cite this article in English as:

Khopin P.N. Evaluation of the friction pairs service life with solid lubricant coatings at the reverse motion in the vacuum conditions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 9, pp. 127–134, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-127-134



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям монографию

«Алгоритмы повышения точности предпо- садочной подготовки беспилотных летательных аппаратов авианосного базирования»

**Авторы: Л. Чжан, К.А. Неусыпин, М.С. Селезнева,
А.В. Пролетарский**

Исследованы алгоритмы обработки информации современных навигационных систем и комплексов беспилотных летательных аппаратов. Представлены наиболее популярные численные критерии степени наблюдаемости, управляемости и идентифицируемости, использующиеся для определения качественных характеристик моделей. Разработан оригинальный численный критерий степени наблюдаемости переменных состояния одного класса нелинейных моделей с применением SDC-метода. Приведен способ оценки степени управляемости переменных состояния моделей критерия степени наблюдаемости и принципа дуальности. Разработана методика выбора используемого в НК информационного поля и навигационных систем НК для проведения коррекции ИНС с учетом условий функционирования БЛА. Предложены критерии формирования динамической рабочей структуры НК в процессе полета БЛА в меняющейся помеховой обстановке, базирующиеся на анализе оценок дисперсий приведенных измеряемых шумов.

Монография предназначена для специалистов в области навигации и систем управления летательными аппаратами.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>