

УДК 539.21.6: 539.1,04

**КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ОКОЛОЗЕМНОГО  
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР**

**Камышан А. С., Комаров Ф. Ф., Пилько В. В., Пилько В. В.**

*НИУ «Институт прикладной физики имени А. Н. Севченко» БГУ  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Программно-аппаратный комплекс разработан для исследования влияния высокого вакуума, облучения кислородной плазмой и потоками квантов в диапазоне энергий от вакуумного ультрафиолета до ближней инфракрасной области на оптические, термоизоляционные и трибологические свойства образцов функциональных материалов космического аппарата (КА) в широком диапазоне доз облучения, моделирующих реальные условия эксплуатации. Позволяет измерять и рассчитывать коэффициенты отражения, трения скольжения, определять износостойкость плоских образцов в паре со стандартными тестовыми дисками, регистрировать коэффициент трения в зависимости от времени испытаний и вакуумных условий, измерять потери массы образца и рассчитывать температуропроводность материала.

**Ключевые слова:** вакуум, ультрафиолетовое, ионное, инфракрасное облучение, трибология.

**COMPLEX FOR STUDYING THE INFLUENCE OF NEAR-EARTH SPACE FACTORS ON THE  
PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AEROSPACE MATERIALS AND INSTRUMENT  
STRUCTURES**

**Kamyshan A., Komarov F., Pilko V. (Sr), Pilko V.**

*A. N. Sevtschenko Institute of Applied Physics BSU  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The software and hardware complex is designed to study the influence of high vacuum, irradiation with oxygen plasma and quantum fluxes in the energy range from vacuum ultraviolet to near-infrared region on the optical, thermal insulation and tribological properties of samples of functional materials of the spacecraft (SC) in a wide range of radiation doses, simulating real operating conditions. Allows to measure and calculate reflection coefficients, sliding friction, determine the wear resistance of flat samples paired with standard test disks, record the friction coefficient depending on test time and vacuum conditions, measure sample mass loss and calculate the thermal conductivity of the material.

**Key words:** vacuum, ultraviolet, ion, infrared irradiation, tribology.

*Адрес для переписки: Комаров Ф. Ф., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь  
e-mail: komarovf@bs u.by*

В связи с созданием в Республике Беларусь собственных космических аппаратов (КА) появилась необходимость в исследовании стойкости конструкционных материалов и изделий электроники, используемых при изготовлении спутников Земли, к воздействию основных факторов околоземного космического пространства. К основным воздействующим на КА факторам можно отнести вакуум, колебания температуры, облучение фотонами и потоками ионов. Для механических устройств КА чрезвычайно критичны также трибологические параметры, такие как коэффициент трения и износ. Разработка новых перспективных конструкционных материалов для КА позволяет существенно повысить срок службы изделий, однако ускорение процессов разработки возможно лишь при использовании новых экспрессных методов контроля эксплуатационных характеристик [1]. Для этой цели необходимо иметь экспериментальные установки, позволяющие в широком диапазоне параметров проводить ускоренное моделирование

процессов эволюции структуры и свойств аэрокосмических материалов и изделий полупроводниковой техники при воздействии основных факторов околоземного космического пространства.

Полный цикл испытаний позволяет свести к минимуму отказы оборудования либо разрушение элементов конструкции, обусловленное:

- низкой стойкостью к влиянию вакуума и высоким газовыделением;
- несогласованностью температурных коэффициентов расширения элементов конструкции и нарушенным тепловым балансом;
- низкой стойкостью к воздействию кислородной плазмы;
- аномально высоким коэффициентом трения и схватыванием трибосопряжений в вакууме, низкой износостойкостью антифрикционных покрытий;
- неприемлемыми значениями коэффициентов поглощения либо отражения фотонов, деградацией отражательной способности.

Оптимизация этих характеристик значительно повышает надежность и ресурс работы КА.

Разработанный комплекс позволяет с использованием одного поста высоковакуумной откачки проводить:

- исследование устойчивости материалов и узлов КА к воздействию высокого вакуума;
- облучение образцов фотонами в диапазоне длин волн 185–570 нм;
- температурные воздействия в диапазоне от  $-75^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ ;
- воздействие на мишень кислородной плазмы с плотностью не менее  $10^{13}$  частиц/см<sup>2</sup>·с и реализацию измерения коэффициента трения с точностью не хуже 0,02 в условиях вакуума не более  $8 \cdot 10^{-5}$  Па;

– определение величины износа элементов трибосопряжений и антифрикционных покрытий после функционирования в вакууме.

С целью повышения плотности ионного тока и экспрессности процесса облучения разработан оригинальный инновационный прямопоточный источник ионов. Новизна разработки подтверждена патентом [2]. Источник работает на газах и газовых смесях и использует для иницирования разряда подогреваемый катод. В диапазоне давлений от  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$  Па при эмиссионных токах катода на уровне 20 мА ток на держателе пропорционален вакууму, измеренному манометром РКР-251. Профиль ионного пучка, экстрагированного через круглое отверстие диаметром 10 мм, просканирован на расстоянии 50 мм от торца источника с помощью электрометрического зонда диаметром 0,5 мм в двух взаимно ортогональных направлениях В и С. Результат измерений представлен на рисунке 1.

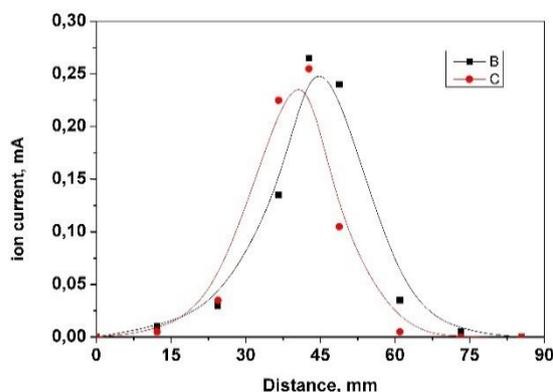


Рисунок 1 – Профиль ионного пучка, экстрагированного через круглое отверстие диаметром 10 мм

Двухнитевая схема катода и сильно локализованное магнитное поле позволяют реализовывать как прямую ударную ионизацию потока рабочего газа, так и режим дугового разряда, причем, в обоих случаях, катод служит элементом электростатической фокусирующей системы в соответствии с патентом [2].

С целью снижения газовой нагрузки на систему откачки от механизма привода и повышения помехоустойчивости устройств регистрации разработан оригинальный вакуумный узел трибометрии «диск на плоскости». Новизна разработки подтверждена патентами [3, 4] и серебряной медалью конкурса инновационных проектов «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» в рамках НИ-ТЕСН и Петербургской технической ярмарки 24–26 апреля 2022 года.

Типичный пример результатов трибометрии представлен на рисунке 2.

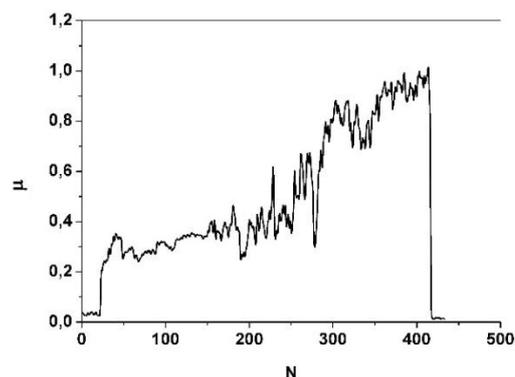


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения от числа оборотов  $N$  для диска из полированной нержавеющей стали в паре со сплавом Д16

Как видно из рисунка, методика позволяет фиксировать момент начала разрушения пассивирующего оксидного слоя на образце при 150 оборотах диска и переход к когезионному взаимодействию материалов трибопары, сопровождающемуся осцилляциями и увеличением коэффициента трения до единицы. Заметно, что дрейф нуля за время испытаний не превышает 5–6 % от регистрируемого амплитудного значения. Чувствительность регистрации коэффициента трения на максимальном пределе близка к 0,01.

После регистрации временной зависимости коэффициента трения сформированный трек износа может быть исследован оптическими методами и путем профилометрии.

#### Литература

1. Климович И. М. Структура, оптические и электрофизические свойства наноструктурированных Ti-Al-N и Ti-Al-C-N покрытий для космической техники. «Перспективные материалы и технологии» – Т.1. – Витбск: УО «ВГТУ», 2019. – С.179–193
2. Патент РБ 13125 МПК H01J. Источник ионов / Пилько, В. В. (ст), Пилько В. В. – Оpubл. 12.01.2023.
3. Патент РБ 12535 МПК G01N 19/02. Устройство для измерения коэффициента трения / Пилько, В. В. (ст), Пилько В. В. – Оpubл. 28.02.2021.
4. Патент РБ 12676 МПК G01L 3/14. Устройство для измерения крутящего момента / Пилько, В. В. (ст), Пилько В. В. – Оpubл. 15.06.2021.