

УДК 621.1:621.89:629.7.081

Н.К. МЫШКИН, акад. НАН Беларуси; А.Я. ГРИГОРЬЕВ, д-р техн. наук
Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель

В.Л. БАСИНЮК, д-р техн. наук; Е.И. МАРДОСЕВИЧ, канд. техн. наук
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

Г.Ф. КОВАЛЬЧУК, С.С. ПАПИНА

Государственное научно-производственное объединение «ПЛАНАР», г. Минск, Республика Беларусь

И.Н. КОВАЛЕВА, канд. техн. наук; В.Г. КУДРИЦКИЙ

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель

КОСМИЧЕСКАЯ ТРИБОЛОГИЯ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Рассмотрены вопросы аппаратно-методического обеспечения экспериментов по оценке триботехнических характеристик перспективных антифрикционных материалов орбитальной техники, проведенных в рамках программ Луна-4, EuTEF и MISSE-7. Приведены схемы и основные технические характеристики приборов, использованных и планируемых к применению для исследования механизмов трения износа материалов в открытом космическом пространстве.

Ключевые слова: космический эксперимент, трение и износ, трибометр, факторы космического пространства, Международная космическая станция

Введение. Космическая трибология — одно из современных направлений в области исследований процессов трения, смазки и износа, протекающих в условиях открытого космического пространства [1—3]. Его появление и развитие обусловлено целым рядом практических задач по обеспечению требуемого ресурса и надежности работы космических аппаратов.

Многие узлы трения орбитальной техники — подшипники, зубчатые и фрикционные передачи, резьбовые соединения, направляющие скольжения и контактные уплотнения — работают вне герметизированных отсеков. Трение в этих узлах происходит в вакууме, невесомости (микрогравитации), при значительных перепадах температуры (170 ... 420 К), воздействии ионизирующего и ультрафиолетового излучения, бомбардировке заряженными и нейтральными частицами и т. п. [4]. В таких условиях механизмы трения и изнашивания существенно отличаются от наземных, что не позволяет использовать традиционные инженерные решения для обеспечения необходимых характеристик и параметров надежности узлов трения.

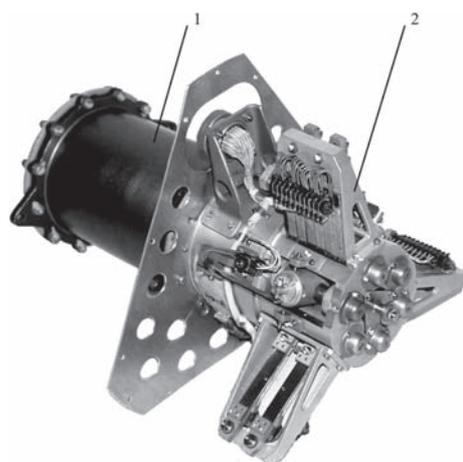
С момента первых запусков космических аппаратов проблемам космической трибологии уделялось самое пристальное внимание. Однако в наземных условиях достаточно сложно провести триботехнические испытания в условиях, соответствующих действующим факторам космического пространства (ФКП). По этой причине рядом национальных космических агентств были реализованы эксперименты по изучению процессов трения и износа в открытом космическом пространстве. В статье представлена информация об известных экспериментах такого рода и приведены данные о перспективах развития методов космической трибологии.

Испытания материалов на трение и износ в рамках программы Луна-4. Первый эксперимент по исследо-

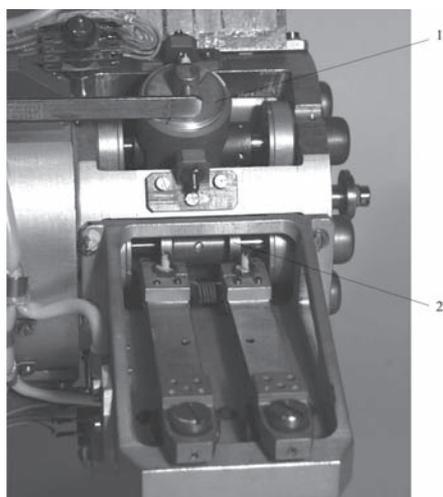
ванию трения и изнашивания материалов в открытом космосе был проведен в ходе выполнения научной программы Луна-4. Для его реализации на НПО им. С.А. Лавочкина был создан прибор — имитатор трения (ИТ), установленный снаружи космического аппарата Луна-22, выведенного на орбиту Луны 29 мая 1974 г. [5, 6]. Конструктивно ИТ состоял из трех модулей: кинематического (315 × 230 × 180 мм, 4,0 кг), измерительного (225 × 170 × 120 мм, 1,5 кг) и управляющего (240 × 180 × 60 мм, 1,5 кг). Кинематический модуль (рисунок 1 а) включал в себя герметичный электромеханический привод 1 и блок узлов трения 2 (см. рисунок 1 б). В приборе были реализованы две схемы испытаний на трение: схема «диск — палец» 1 и схема «вал — втулка» 2. Одновременно испытывались девять образцов: три по схеме «вал — втулка» и шесть — «диск — палец».

Испытуемые образцы представляли собой антифрикционные композиционные полимерные покрытия с добавлением MoS₂ марки ВНИИ НП-212. Покрытия толщиной 15 ± 5 мкм наносилось на образцы из алюминиевого сплава АМГ-6. Контртела изготавливались из сплава Д16Т. Для пары «вал — втулка» испытания проводились при скорости скольжения 8 мм/с, а для пары «диск — палец» — 10 мм/с. В ходе испытаний оценивались коэффициент трения и ресурс работы антифрикционного покрытия, оцениваемый по времени достижения коэффициентом трения величины большей 0,3 (считалось, что при этом покрытие полностью изнашивается). Суммарная продолжительность работы прибора ИТ на борту космического аппарата составила 128 часов.

С помощью данного прибора был получен ряд интересных результатов [2]. В частности, оказалось, что оценки триботехнических характеристик мате-



а



б

Рисунок 1 — Имитатор трения:
а — общий вид; б — блок узлов трения

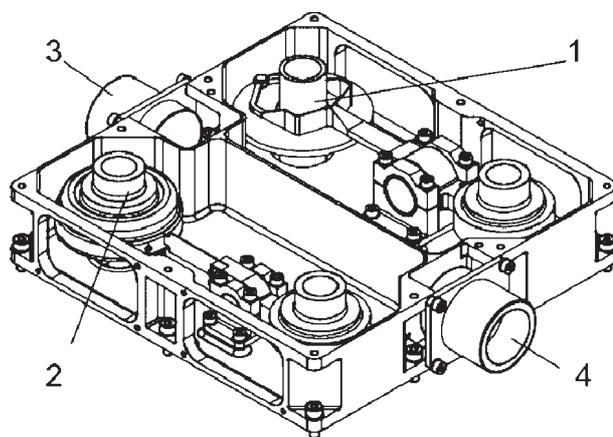
риалов, полученные в наземных имитационных условиях, несколько хуже, чем при бортовых испытаниях. Установившийся коэффициент трения оказался выше на 10 %, а ресурс работы покрытия ниже на 20 %. Анализ показал, что одной из причин этого явились более жесткие условия наземных имитационных испытаний. В частности, было установлено, что в результате дегазации элементов конструкций и интенсивного испарения их материалов, вокруг космического аппарата создается локальная остаточная атмосфера с давлением порядка 10^{-2} Па, что приблизительно на порядок выше давления технологического вакуума при наземных испытаниях. Кроме того, на увеличение ресурса работы покрытий в космическом эксперименте влияет микрогравитация, приводящая к образованию скопления частиц износа вокруг узла трения и способствующая их возврату на изношенные поверхности.

Новые возможности в области космической трибологии открылись с началом эксплуатации Международной космической станции (МКС). На борту станции уже поставлены два эксперимента и планируется к осуществлению третий.

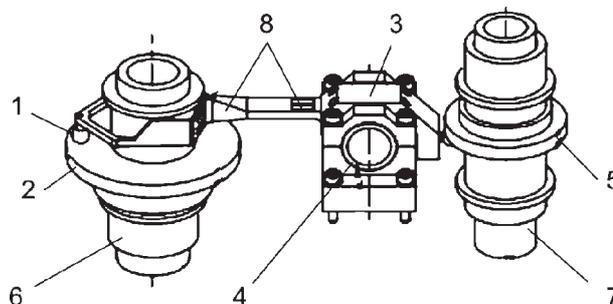
Эксперимент «TribolAB» Европейского аэрокосмического агентства. TribolAB является одним из приборов, использованных Европейским космическим агентством в комплексном эксперименте EuTEF по изучению влияния ФКП на свойства материалов [7, 8]. Экспериментальная установка и программа испытаний разработаны Национальным институтом аэрокосмической техники Испании (INTA), Испанским научно-технологическим центром (INASMET) при участии Европейской лаборатории космической трибологии (ESTL).

Конструктивно прибор представляет собой стойку из четырех вертикально расположенных секций. Каждая секция включает 4 модуля (рисунок 2 а): модуль испытаний материалов на трение по схеме «палец — диск» 1, модуль испытаний подшипников качения 2 и две эффузионные ячейки 3 и 4 для измерений потерь смазки через лабиринтные уплотнения.

Модуль трибометра (см. рисунок 2 б) состоит из сферического индентора 1 и диска 2, на который наносится испытуемый материал. Нагрузка осуществляется рычагом 3, расположенным на торсионе 4 и опирающимся на кулачок 5. Диск 2 и кулачок 4 приводятся во вращение от отдельных приводов валами 6 и 7, проходящими через все четыре секции прибора. Профили кулачков 5 на секциях прибора спроектированы таким образом, что в заданный момент времени под нагрузкой может находиться только одна



а



б

Рисунок 2 — Триботехническое оборудование эксперимента TribolAB: а — секция испытательных модулей; б — компоновка трибометра [7]

пара трения. Измерение сил трения и нагрузки производится тензометрическими датчиками 8.

Модуль трения обеспечивает проведение испытаний сферическим стальным индентором диаметром 6 мм при постоянной нагрузке 5 Н, частоте вращения диска 50 об/мин на дорожке трения радиусом 25 мм. Прибор оборудован системой автоматического прерывания эксперимента при достижении коэффициента трения большего 0,2 в течение 60 с.

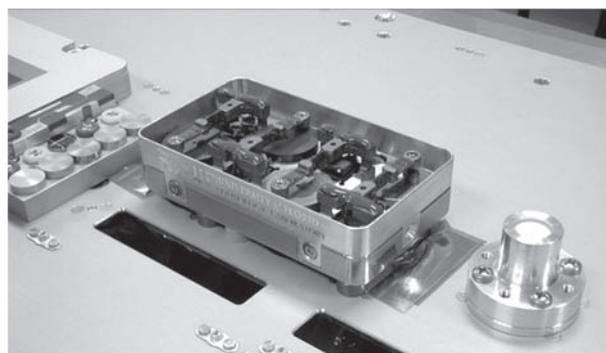
Конструктивные особенности модулей подшипников качения и эффузионных ячеек разработчиками не описаны.

Установка была доставлена на МКС в феврале 2008 года. Эксперимент длился один год — в конце 2009 года прибор был возвращен на Землю. Полный перечень испытанных материалов и программа эксперимента не раскрывается. Приводятся лишь сравнительные данные испытаний композиционного покрытия, в котором MoS_2 имплантирован в тонкий слой WC. Также как и в эксперименте, проведенном на ИТ, отмечается увеличение стойкости покрытий при испытаниях на орбите по сравнению с наземными результатами (приблизительно в 2 раза) и близость значений коэффициентов трения (около 0,05).

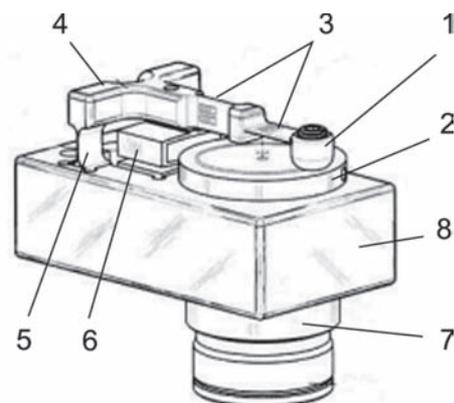
Эксперимент Национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA). Эксперимент NASA по исследованию трения и износа в космосе выполнялся в рамках программы MISSE-7 (изучение деградации материалов под действием факторов космического пространства) [9]. В ноябре 2009 г. специальная платформа с образцами более чем 1500 различных материалов и двумя трибометрическими модулями была установлена на технологической платформе на внешней стороне МКС.

Каждый из модулей (рисунок 3 а) представлял собой сборку из восьми малогабаритных трибометров (см. рисунок 3 б), реализующих схему трения «палец — диск» со сферическим наконечником 1 по диску 2. Измерение нагрузки и силы трения осуществлялось с помощью тензометрических балок 3, расположенных на балке 4 с упругой подвеской 5. Задание нагрузки на палец осуществлялось с помощью пьезоэлектрического элемента 6. Диск приводился во вращение двигателем постоянного тока 7. Управляющая электроника трибометра располагалась в корпусе 8. Результаты измерения каждого трибометра записывались на твердотельный накопитель и после окончания цикла измерений передавались по каналу телеметрии на наземную станцию.

Испытания проводились при нагрузках до 1 Н и линейной скорости скольжения 13,2 мм/с. Радиус дорожки скольжения составлял 9 мм, а радиус стального индентора 1,6 мм. Модули располагались на разных сторонах платформы, что соответствовало их ориентации в направлении вектора движения станции. Это позволило оценить влияние на процессы трения атомарного кислорода, присутствующего на низких околоземных орбитах.



а



б

Рисунок 3 — Космический трибометр эксперимента MISSE-7: а — сборка из четырех трибометров, установленная на экспозиционную платформу; б — компоновка трибометра [9]

Программа проведения эксперимента основывалась на 92-минутных периодах обращения МКС по орбите вокруг Земли. В течение первой недели приборы включались при проходе 1, 2, 5, 10, 20, 50 и 1000 орбиты. После этого модули включались при прохождении каждой сотой орбиты. На рабочей орбите на каждом из трибометров проводилось по 16 экспериментов. Цикл испытаний длился одну минуту — по 30 секунд при прямом и реверсивном вращении привода. Одновременно работал только один трибометр в каждом из модулей.

Испытывались пленки из золота, серебра, свинца и индия, полимерные композиты на основе политетрафторэтилена с наполнителем из наночастиц Al_2O_3 , твердосмазочные покрытия на основе MoS_2 , а также слоистые системы $\text{MoS}_2/\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{Au}$ и $\text{MoS}_2/\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{C}$.

В мае 2011 г. платформа с трибометрами была возвращена на Землю. Результаты эксперимента в научной литературе пока не обсуждались.

Результаты подготовки эксперимента «Трибокосмос» Российского космического агентства. В рамках реализации программ Союзного государства Космос-СГ и Космос-НТ в течение 2005—2011 годов рядом организаций Союзного государства была проведена НИОКР по отработке технических решений, необходимых для реализации космического эксперимента Трибокосмос. Его постановка предусматривает решение целого комплекса задач, включаю-

щих создание испытательной аппаратуры, разработки новых материалов, наземных и бортовых методов испытаний [10—12].

К настоящему времени разработаны два типа приборов для испытаний по схемам «палец — диск» и «вал — конформный вкладыш» (рисунок 4 а, б). Схемы приборов представлены на рисунке 4 в, г.

В приборе для проведения испытаний по схеме «диск — палец» (бортовой трибометр — БТ) испытуемый материал изготавливается в виде диска 1 или наносится в виде покрытия на него. С каждой стороны к диску прижимаются по три индентора 2, которые имеют плоскую или сферическую форму торцов. Требуемая нагрузка P создается упругими элементами 3, попарно соединяющими инденторы, расположенными на противоположных сторонах диска. Каждая пара инденторов находится на разных расстояниях от центра диска r . Значения нормальной нагрузки и возникающих при вращении диска сил трения регистрируются тензометрическими балками 4. Вращение диска 2 осуществляется двигателем 5.

Испытания по второй схеме планируется проводить на модуле подшипников скольжения (МПС), блок образцов которого представлен на рисунке 4 г. К «валу — ролику» 1 прижимаются два вкладыша 2 из испытуемого материала. Нормальная нагрузка P задается деформацией упругого элемента. Измерение момента вращения производится с помощью тензометрических балок 3. На МПС размещено два блока образцов, что позволяет одновременно испытывать при одной скорости четыре образца при разных нагрузках.

В качестве привода вращения в разработанном оборудовании используется синхронный бесколлекторный двигатель с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов и цифровым управлением [13]. Привод обеспечивает работу прибора

в условиях действия ФКП при температурах от 170 до 420 К и вакууме до 0,01 Па. Общий вид разработанных приборов представлен на рисунке 5.

Испытания планируется проводить при нормальных нагрузках на образцы от 1 до 30 Н и линейной скорости скольжения до 1,0 м/с. В ходе испытаний приборы будут расположены на наружной технологической площадке МКС. Данные будут передавать на Землю в режиме реального времени по телеметрическим каналам. Продолжительность эксперимента должна составить не менее одного, а при возможности (оптимистический прогноз) два года с заменой образцов экипажем.

В конце 2011 года оборудование было передано на НПО им. С.А. Лавочкина для проведения ресурсных испытаний и отработки методик исследований.

Заключение. Обеспечение работоспособности подвижных сопряжений в условиях высокого вакуума, низких температур и радиационных воздействий является одной из наиболее актуальных задач современной космической отрасли, обусловленной необходимостью увеличения ресурса работы новой орбитальной техники до 10, а в перспективе и до 15 лет. Ее решение потребовало проведения натурных трибоиспытаний материалов в условиях действия факторов космического пространства. К настоящему времени проведено три и планируется к реализации четвертый эксперимент по изучению механизмов трения и износа в открытом космосе.

Использованное и проектируемое оборудование космических экспериментов существенно отличается по своим возможностям, обеспечивая испытания в разных диапазонах нагрузочно-скоростных параметров. Поскольку ни одна из сторон не сможет реализовать испытания во всех требуемых по условиям эксплуатации режимах работы узлов трения,

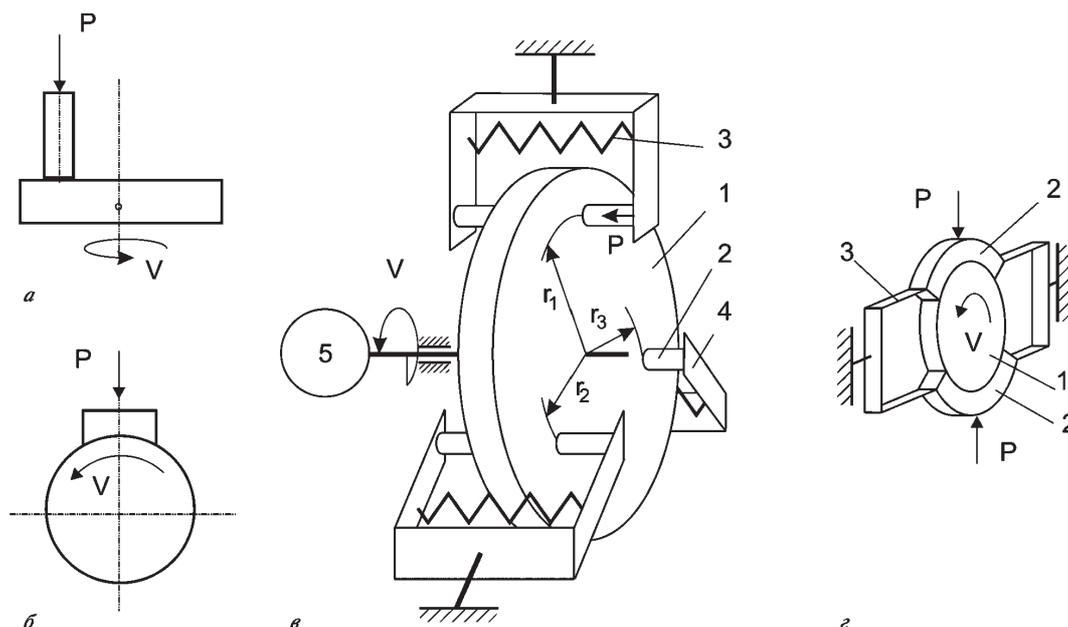
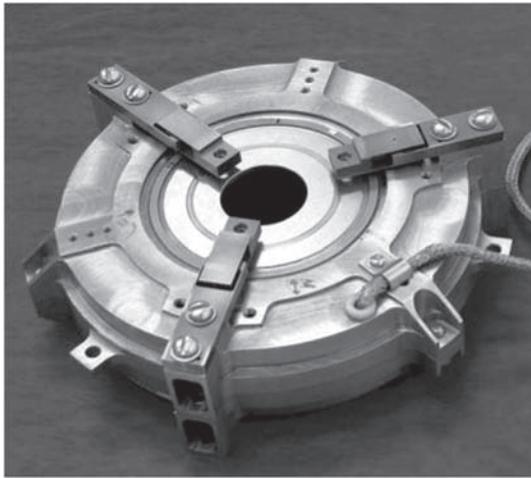
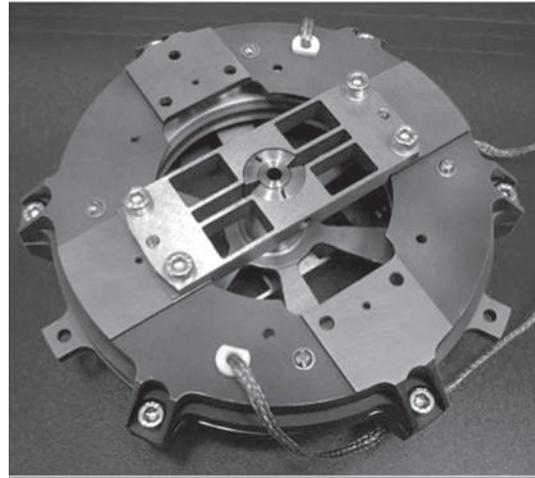


Рисунок 4 — Схемы испытаний материалов на трение и износ, используемые в космическом эксперименте: а — диск-палец (индентор); б — вал — конформный вкладыш; в — кинематическая схема бортового трибометра (БТ); г — блок образцов модуля подшипников скольжения



а



б

Рисунок 5 — Оборудование для проведения испытаний материалов на трение и износ:
а — бортовой трибометр; б — модуль подшипников скольжения

полноценный анализ данных потребует в перспективе развития сотрудничества в этой области.

Большинство испытанных в условиях космического пространства антифрикционных материалов относится к классу твердосмазочных покрытий. Наибольшее внимание уделяется композиционным материалам на основе MoS_2 , показавшим высокую износостойкость и низкий, в пределах 0,03...0,05, коэффициент трения. Результаты экспериментов свидетельствуют о перспективности многослойных систем WC-MoS₂, MoS₂/Sb₂O₃/Au и MoS₂/Sb₂O₃/C, а также полимерных нанокompозитов на основе политетрафторэтилена и Al₂O₃. В тоже время, несмотря на актуальность этой задачи, в реализованных экспериментах не исследовались смазанные узлы трения. Очевидно, что это связано со сложностью создания соответствующего испытательного оборудования.

Данные, полученные при исследованиях износа в рамках программ EuTEF и MISSE-7, подтвердили выводы первого космического эксперимента о положительном влиянии микрогравитации на износостойкость материалов за счет возврата частиц износа на поверхность трения. Сравнение результатов орбитальных и наземных имитационных испытаний свидетельствует о незначительном увеличении коэффициента трения в условиях технологического вакуума.

Список литературы

1. Джост, Х.П. Прошлое и будущее трибологии / Х.П. Джост // Трение и износ. — 1990. — Т. 11, № 1. — С. 4—15.

2. Jones, W.R. Space Tribology / W.R. Jones, M.J. Jansen, // NASA Technical Reports. — 2000. — No TM-2000-209924. — 40 p.
3. Дроздов, Ю.Н. Космическая трибология / Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов // Прикладная трибология (трение, износ, смазка). — М.: Эко-Пресс, 2010. — 604 с.
4. Дроздов, Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков // Трение и износ в экстремальных условиях: справ. — М.: Машиностроение, 1986. — 224 с.
5. Имитатор трения / Н.Е. Богорад [и др.] // Современные методы и средства измерения внешнего трения: сб. науч. тр. — М.: НИИ ФТРИ, 1977. — С. 8—10.
6. Ярош, В.М. Исследование материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве и на орбите вокруг Луны / В.М. Ярош, А.А. Моисев, М.А. Броневец // Трение и износ. — 2003. — Т. 24, № 6. — С. 626—635.
7. The vacuum tribology model (VTM) of TriboLAB / A. Landaberea [et al.] // Proc. of the 10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 24—26 Sept. 2003, San Sebastian. — 2003. — Pp. 67—70.
8. TriboLAB: an experiment on space tribology. In-orbit data at the ISS / M. Bruzuela [et al.] // Proc. of the 13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 23-25 Sept. 2009, Sebastian. — Pp. 281—283.
9. Kirk, V.A. Space tribometers: design for exposed experiments on orbit / V.A. Kirk, W.G. Sawyer // Tribology letters. — 2011. — Vol. 41. — Pp. 303—311.
10. Мышкин, Н.К. Разработка оборудования для выполнения космического эксперимента «Материал-Трение» / Н.К. Мышкин, А.Я. Григорьев, М.А. Броневец // Тр. II Белорус. космич. конгр. Минск, 25—27 окт. 2005 г. — С. 50—54.
11. Наземные и бортовые испытания материалов на трение в космосе / Н.К. Мышкин [и др.] // Информатика. — 2007. — № 3. — С. 41—50.
12. Испытание материалов на трение в космосе / Н.К. Мышкин [и др.] // Инженер-механик. — 2010. — № 1. — С. 9—15.
13. Особенности конструирования и применения приводных систем прямого действия в составе бортовой аппаратуры космической техники / П.А. Витязь [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2010. — Т. 13, № 4. — С. 5—10.

Myshkin N.K., Grigoriev A.Ya., Basiniuk U.L., Mardosevich A.I., Kovalchuk G.F., Papina S.S., Kovaleva I.N., Kudrytski V.G.

Space tribology: the states and prospects

The design features of experimental equipments for evaluation tribological properties of anti-friction materials of orbiting vehicles carried out under the space programs Luna-4, EuTEF and MISSE-7 were discussed. The schemes and the technical specifications of the devices used or planned for use in studies of wear and friction of materials in open space are presented.

Поступила в редакцию 14.08.2012.