

УДК 536.42:621.891

Г. Д. Гамуля¹, Г. А. Фролов², А. Д. Колотило², Д. В. Боровик²

¹Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, Харків

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, Київ

КОМПЛЕКТ МОДУЛЬНЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «МАТЕРИАЛ–ТРЕНИЕ» И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ИСПЫТАНИЙ

Розглянуто стан робіт з підготовки наукового устаткування для проведення космічного експерименту «Матеріал – Тертя». Представлено комплект модульних трибометрів для випробувань за схемами: диск – інденстор, вал – втулка, підшипник кочення, зубчата передача та наведено результати їх випробувань.

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих работах [1, 5, 12, 16, 17] и докладах на конференциях [2–4, 6–8, 10, 11, 15, 18, 19] достаточно подробно представлен ход работ по подготовке совместного российско-украинского космического эксперимента (КЭ) «Материал–Трение», проведение которого планируется на Российском сегменте Международной космической станции (РС МКС).

Проведение эксперимента предусматривает решение нескольких задач:

- определение адекватности характеристик трения и изнашивания идентичных материалов по результатам их испытаний в условиях воздействия факторов космического пространства (ФКП) и наземных лабораториях;
- установление влияния факторов космического пространства на коэффициенты трения и механизмы изнашивания антифрикционных и износостойких материалов;
- определение триботехнических характеристик новых антифрикционных материалов и покрытий;
- создание банка данных по материалам, перспективным для узлов трения космических аппаратов (КА);

- создание методик по аттестации (сертификации) материалов, применяемых в ракетно-космической технике (РКТ);

- прогнозирование долговременной работоспособности узлов трения КА.

Для проведения экспериментов планируется использовать модульные трибометры, выполненные по схемам «диск-инденстор», «вал-втулка», «зубчатая передача» и «подшипник качения».

В настоящее время над разработкой и изготовлением трибометров на Украине работают Институт проблем материаловедения НАН Украины (ИПМ НАН Украины), Физико-технический институт низких температур НАН Украины (ФТИНТ НАН Украины), Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» (ГП «КБ «Южное») и Научно-исследовательский институт прецизионных измерений при Государственном предприятии «Всеукраинский государственный научно-производственный центр стандартизации, метрологии, сертификации и защиты прав потребителей» (ИПИ Укрметртест-стандарт).

Выполнение поставленных задач невозможно без параллельных исследований на аналогичных трибометрах в наземных лабораторных условиях. Для проведения таких исследований в ФТИНТ НАН Украины и ИПМ НАН Украины были модернизированы и дооснащены установ-

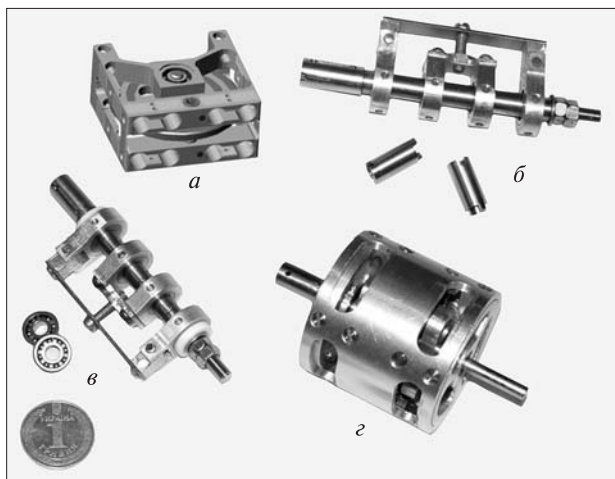


Рис. 1. Внешний вид модульных узлов трения: *a* – диск-индентор (вариант 2) [1], *б* – вал–втулка, *в* – подшипник качения, *г* – зубчатая передача

ки УТИ-А и «Уран-Т». Лабораторная исследовательская установка УТИ-А (ФТИНТ НАН Украины) [9] позволяет моделировать вакуум и низкие температуры, т. е. дает возможность проводить эксперименты в диапазоне температур от -100 до $+20$ °С. Установка «Уран-Т» (ИПМ НАН Украины) дополнительно оснащена концентратором лучистой энергии на базе ксеноновой лампы ДКСШРБ-10000, что позволяет моделировать термоциклирование в диапазоне температур от -100 до $+150$ °С [3].

На этих установках были проведены исследования модульных узлов трения, в том числе ресурсные испытания в вакууме, продолжительностью не менее 5 ч, что предусмотрено в ТЗ на КЭ «Материал — Трение».

КОМПЛЕКТ УЗЛОВ ТРЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ ТРИБОМЕТРОВ

Согласно проекту технического задания (ТЗ) на НА «Трение» полный комплект НА включает многопозиционный бортовой трибометр (БТ), многопозиционный бортовой модуль подшипников скольжения (МПС), модуль подшипников качения (МПК) и модуль зубчатых передач (МЗП). Многопозиционный бортовой трибометр должен обеспечить испытания 24 пар трения по схеме «диск-индентор», МПС — 16 пар трения по схеме «вал — втулка», МПК — четыре подшипника качения. Количество одновременно испытываемых зубчатых колес в МЗП зависит от его конструкции, и в ТЗ не определено.

На рис. 1 показан комплект модульных узлов трения по схемам «диск-индентор», «вал — втулка», «подшипник качения» и «зубчатая передача». В процессе подготовки этих трибометров было предложено два варианта узлов трения по схеме «диск-индентор». Первая схема разработана ФТИНТ НАН Украины и должна в ос-

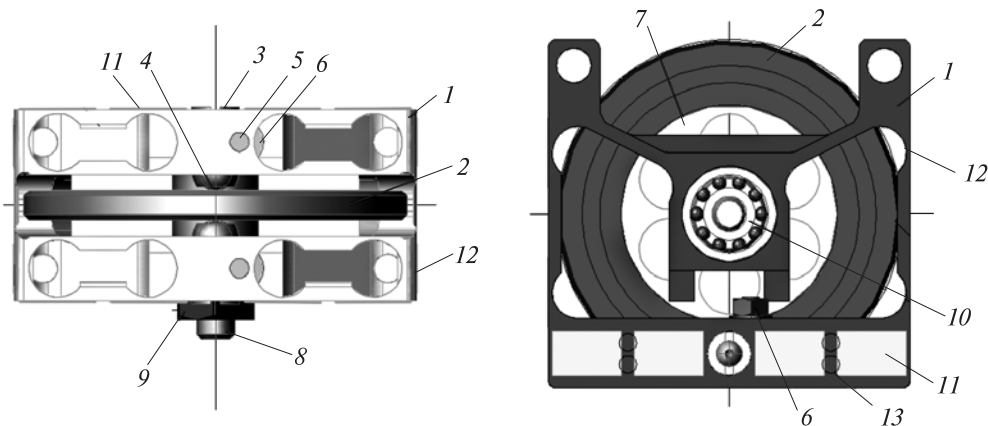


Рис. 2. Схема модульного узла трения «диск-индентор» (вариант 2): *1* – двух-координатный упругий элемент, *2* – диск, *3* – втулка, *4* – цилиндрические инденторы; *5* – клин, *6* – гайка, *7* – вставка, *8* – буртик вала, *9* – гайка, *10* – радиально-упорный подшипник, *11* – тензорезисторы для измерения нормальной силы, *12* – тензорезисторы для измерений силы трения, *13* – изоляционные трубки

новном обеспечить испытания покрытий, которые наносятся на контртело — диск, а индентором является шарик из стали ШХ-15 [12]. Вторая схема, в которой индентором (палец) является исследуемый материал, разработана в ИПМ НАН Украины [1].

Основной отличительной особенностью конструкции этого узла трения от ранее применявшихся [20] является возможность измерения износа пары трения в режиме непрерывного мониторинга и передачи этой информации на Землю по телеметрии, т. е. возможность проведения КЭ без участия космонавта [5]. Поэтому при доработке одной из первых конструкций модульного узла трения (рис. 2), основное внимание было обращено на повышение точности измерений и исключения всевозможных помех (механических, электрических и др.).

Модульные узлы трения вал-втулка, подшипник качения и зубчатая передача были разработаны в ФТИНТ НАН Украины. Схемы этих узлов трения представлены на рис. 3, 4. Узел трения по схеме «зубчатая передача» представляет собой планетарный механизм, в котором в зацеплении с зубьями двух ведомых шестерен 5 (рис. 4) с внутренним диаметром 39.2 мм находятся шесть сателлитных шестерен 4 диаметром 16.8 мм. Была рассмотрена возможность изме-

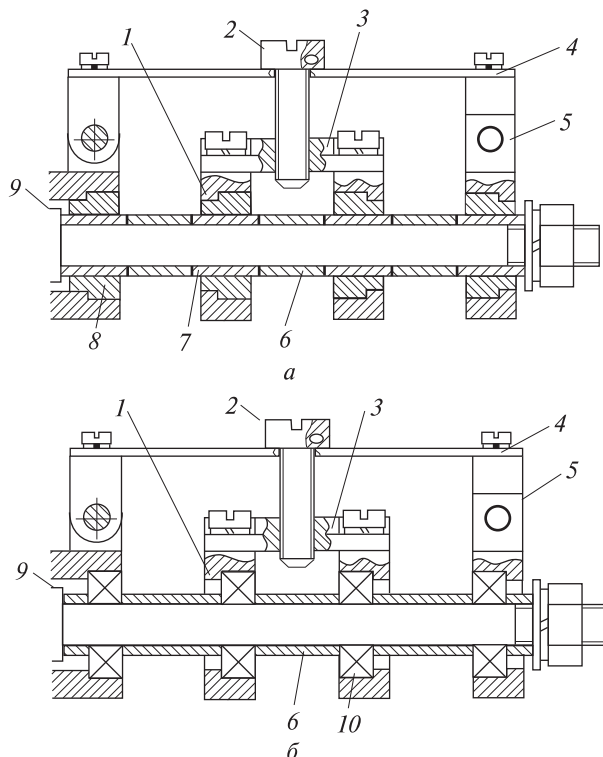


Рис. 3. Схемы модульных узлов трения «вал-втулка» (а) и «подшипник-качения» (б): 1 — обойма, 2 — нагрузочный винт, 3 — тензобалка, 4 — пластина; 5 — стойка, 6 — промежуточная втулка, 7 — образцы-валы, 8 — образцы-втулки, 9 — приводной вал, 10 — образец подшипника

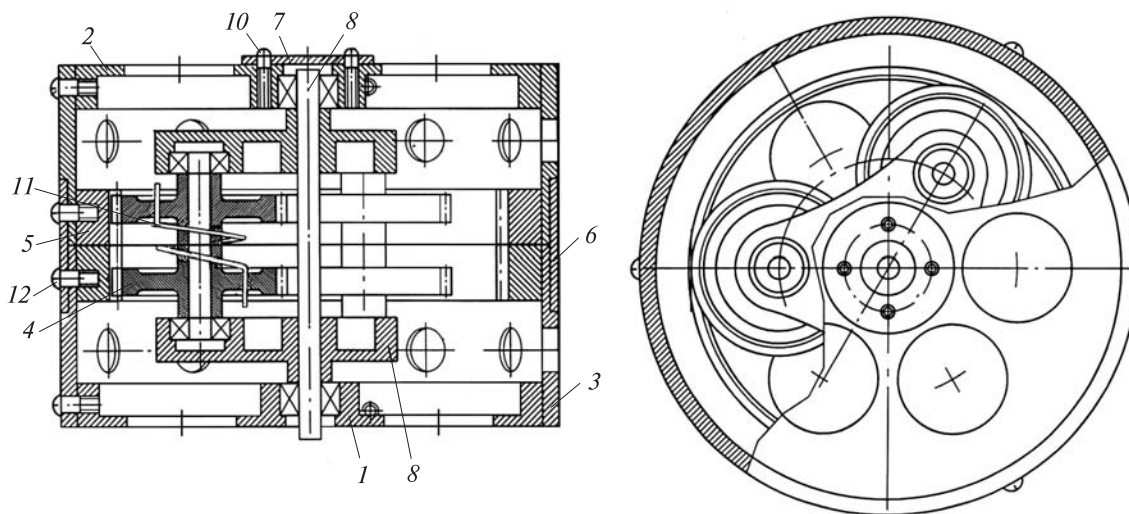


Рис. 4. Схема модульного узла трения «зубчатая передача»: 1, 2 — торцевые крышки, 3 — цилиндрический корпус, 4 — сателлитные колеса, 5 — ведомое колесо, 6 — переходное кольцо, 7 — крышка, 8 — водила, 9 — приводной вал, 10 — винт, 11 — цилиндрические пружины кручения, 12 — стопорный винт

рения износа зубьев в режиме непрерывного мониторинга [19], которая пока не нашла практической реализации.

Как видно из рис. 1, научная аппаратура для КЭ «Материал–Трение», разрабатываемая Ук-раиной, представляет собой блочное малогабаритное оборудование, позволяющее набирать любое количество пар трения по различным схемам. Окончательная конфигурация этой аппаратуры определяется в основном ресурсами КА, на котором будет проводиться эксперимент.

ИССЛЕДОВАНИЯ МОДУЛЬНЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ УТИ-А И «УРАН-Т»

Согласно Государственному стандарту Украины ДСТУ 2823-94 различают следующие периоды изменения фрикционного состояния трибосистемы во времени:

период приработки — постепенный переход трибосистемы в стационарное состояние, обусловленный изменением геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев материалов;

период установившегося трения — стационарное состояние трибосистемы, которое характеризуется динамическим равновесием и саморегулированием процессов в трибосистеме и отличается постоянством характеристик трения и изнашивания;

заедание — нестационарное состояние трибосистемы, характеризующееся самопроизвольным развитием процесса увеличения силы трения и повреждения поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала. Заедание может завершиться прекращением относительного движения.

Текущее значение коэффициента трения f рассчитывают по формуле $f = F/N$, где F — текущее значение силы трения, N — нормальная нагрузка при испытании.

При определении коэффициентов трения, соответствующих основным периодам трения, используют следующие значения силы трения:

- коэффициент трения в период приработки рассчитывают по максимальному значению силы трения в этот период;

- коэффициент трения в установившийся период рассчитывают по среднему значению коэффициента трения в этот период;

- коэффициент трения в момент заедания рассчитывают по максимальному значению силы трения в этот период трения.

Для оценки длительности периодов трения и проверки работоспособности разработанных конструкций модульных узлов были проведены испытания при атмосферном давлении длительностью около 60 мин с частотой вращения вала 500 об/мин и значениях нормальной нагрузки 10, 15, 20 и 30 Н.

Результаты испытаний сведены в табл. 1, из которой следует, что при испытаниях макета узла трения по схеме «вал — втулка» при нагрузке 20 Н коэффициент трения в начале трения (0.75) и при приработке (0.45) превышает максимально допустимое в проекте ТЗ значение (0.4). Повышение нормальной нагрузки до 30 Н приводит к снижению значений коэффициента трения (0.48, 0.25 и 0.15 в начале трения, при приработке и в установившийся период трения соответственно).

При испытаниях макета узла трения по схеме «подшипник качения» при нагрузке 20 Н коэффициент трения в различные периоды трения не превышает максимально допустимого значения. Повышение нормальной нагрузки до 30 Н приводит к снижению значения коэффициента трения от 0.11 до 0.05 (в начале трения) и от 0.075 до 0.05 (в периоды приработки и установившегося трения).

При испытаниях макета узла трения по схеме «диск-индентор» (вариант 1, диск изготовлен из фторопласта-4, индентор (шарик) — из стали ШХ-15) при нормальной нагрузке 15 Н значения коэффициента трения составляют 0.27, 0.20 и 0.15 (в начале трения, при приработке и в установившийся период трения соответственно).

Изготовление диска из материала эбонита влечет за собой незначительное увеличение значений коэффициента трения во все периоды трения (0.32, 0.28 и 0.22 соответственно).

При испытаниях пары трения «сталь 45 — сталь ШХ-15» даже при меньшей нагрузке (10 Н) значение коэффициента трения в период прира-

ботки (0.42) превышает максимально допустимое значение, заданное по ТЗ.

Для сравнения работоспособности макетов модульных узлов трения при различных давлениях испытания проводились в два этапа.

Режим испытаний на первом этапе:

- давление окружающей среды (атмосферный воздух) — $1.013 \cdot 10^5$ Па;
- начальная температура испытаний — 20 °С;
- нормальная нагрузка вала — 5 и 50 Н;
- частота вращения вала — 65 мин^{-1} ;
- длительность испытаний — 30 мин.

На втором этапе испытаний (вакуум) давление составляло 0.02 Па при сохранении вышеуказанных параметров.

Результаты триботехнических испытаний сведены в табл. 2. Поскольку для изготовления пар трения были подобраны материалы, у кото-

рых коэффициент трения слабо зависит от давления окружающей среды, то результаты табл. 2 подтверждают одинаковую работоспособность разработанных модульных узлов трения при атмосферном давлении и в вакууме.

ИССЛЕДОВАНИЯ МОДУЛЬНОГО УЗЛА ТРЕНИЯ ПО СХЕМЕ «ДИСК-ИНДЕНТОР» (ВАРИАНТ 2) НА УСТАНОВКЕ «УРАН-Т»

Испытания модульного узла трения по схеме «диск-индентор» (вариант 2) на установке «Уран-Т» в основном выполнялись с целью проверки его работоспособности и оценки возможности определения износа по динамике изменения нормальной нагрузки в процессе трения [2].

Испытания проводились при атмосферном давлении и в вакууме. Контртело (диск) в паре

Таблица 1. Результаты испытаний макетов модульных узлов трения

Модульный узел трения	Материал элемента узла трения	N, Н	f		
			Начало трения	Приработка	Установившееся трение
Вал — втулка	Вал — сталь 45	20.0	0.75	0.45	0.17
	Втулка — фторопласт-4	30.0	0.48	0.25	0.15
Подшипник качения	Шарикоподшипник 1000095Ю	20.0	0.11	0.075	0.075
		30.0	0.05	0.05	0.05
Диск-индентор (вариант 1)	Диск — фторопласт-4	15.0	0.27	0.20	0.15
	Индентор — сталь ШХ-15	15.0	0.32	0.28	0.22
	Диск — эбонит	15.0	0.32	0.28	0.22
	Индентор — сталь ШХ-15	15.0	0.32	0.28	0.22
	Диск — сталь 45	10.0	0.30	0.42	0.30
	Индентор — сталь ШХ-15	10.0	0.30	0.42	0.30

Таблица 2. Результаты сравнительных триботехнических испытаний модульных узлов трения при атмосферном давлении и в вакууме

Модульный узел трения	Материал элемента узла трения	Среда	N, Н	f		
				Начало трения	Приработка	Установившееся трение
Подшипник скольжения	Вал — сталь 09Х16Н4Б	воздух	5.0	0.18	0.18	0.18
	Втулка — фторопласт-4	вакуум	5.0	0.18	0.24	0.18
Подшипник качения	Кольца — сталь ШХ-15	воздух	50.0	0.17	0.18	0.17
	Шарики — сталь ШХ-15	вакуум	50.0	0.22	0.22	0.22
Зубчатая передача	Шестерни — сталь 09Х16Н4Б	воздух	50.0	0.02*	0.02*	0.02*
	Колеса — сталь 09Х16Н4Б	вакуум	50.0	0.02*	0.02*	0.02*

* — указан момент сопротивления, $\text{кГ} \cdot \text{см}$

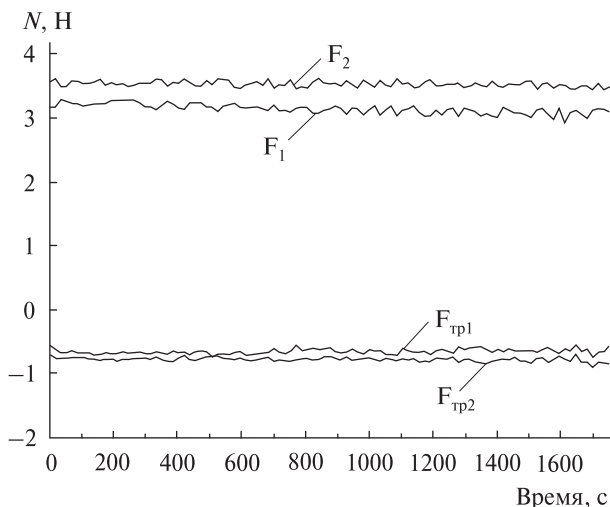


Рис. 5. Зависимость усилия прижима (F_1 , F_2) и силы трения ($F_{тр1}$, $F_{тр2}$) от времени испытаний в вакууме для пары трения: индентор — материал СКАМ-ИПМ, диск — ШХ15

трения было изготовлено из стали ШХ-15, а для инденторов использовались различные материалы. Испытания на воздухе оловянно-свинцовой бронзы в установившемся режиме дали значение коэффициента трения 0.18, а бронзографита — 0.14. Для изготовления узлов трения КА часто используют твердосмазочные покрытия, которые могут иметь коэффициент трения 0.1 и ниже. Однако низкий коэффициент трения можно также получить, используя современные ревитализаторы. С целью проверки работоспособности модульного узла трения при низких значениях коэффициента трения был испытан образец материала на основе титана с ревитализатором ХАДО, который применяется

для улучшения эксплуатационных характеристик сопряженных поверхностей различных механизмов. Без ревитализатора коэффициент сухого трения образцов этого материала может превышать 0.4, что выше граничного значения, указанного в проекте ТЗ на НА «Трение». Испытания проводились на воздухе. Износ составил 50 мкм/км при коэффициенте трения 0.1–0.13. При этом температура в зоне трения не превышала 37 °С.

Компьютерная запись изменения нагрузки и силы трения при испытаниях СКАМ-ИПМ 305 в вакууме, полученная с помощью системы измерения и управления, разработанной под руководством профессора М. Н. Сурду, приведена на рис. 5. Испытания проводились при скорости скольжения 0.1 м/с и нагрузке 30 Н, что при диаметре торца индентора 2 мм соответствовало удельному давлению 10 МПа. Полученное значение коэффициента трения данной пары в этих условиях изменялось от 0.17 до 0.2. С учетом более высокой скорости скольжения (1 м/с) эти результаты удовлетворительно согласуются и с данными испытаний на установке УТИ-А [9] ($f_{тр} \approx 0.16$). Как показано в работе [14], с увеличением скорости скольжения коэффициент трения материалов серии СКАМ-ИПМ уменьшается.

Особый интерес представляет измерение износа по динамике снижения нормальной нагрузки на индентор. Анализ результатов, приведенных на рис. 5, дал значение 15 мкм/км, что практически совпало с прямыми измерениями износа индентора.

Таблица 3. Программа ресурсных испытаний модульных узлов трения с различными кинематическими схемами в условиях вакуума (давление 0.02 Па, температура 20 °С) на установке УТИ-А

Модульный узел трения	Параметры трения		
	характеристика скорости движения	нагрузочная характеристика	продолжительность эксперимента, мин
Подшипник скольжения	Частота вращения вала (ведущего образца) 75 мин ⁻¹	Нормальная нагрузка до 20 Н	300
Подшипник качения	Частота вращения внутреннего кольца шарикоподшипника 75 мин ⁻¹	Радиальная нагрузка до 50 Н	300
Зубчатая передача	Частота вращения сателлитных шестерен 300 мин ⁻¹	Контактное напряжение не более 800 МПа	300

Таким образом, испытания на воздухе и в вакууме макетов модульных узлов трения бортовых трибометров с различными кинематическими схемами (диск-индентор, подшипник скольжения, подшипник качения и зубчатая передача) подтвердили их работоспособность и достаточную точность измерения триботехнических характеристик.

Дальнейшие исследования модульных узлов трения должны быть проведены во всем диапазоне скоростей скольжения, нагрузок, температур и максимальном времени работы, заданных в проекте ТЗ на НА «Трение».

РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОДУЛЬНЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ В ВАКУУМЕ НА УСТАНОВКАХ УТИ-А И «УРАН-Т»

В табл. 3 приведена программа ресурсных испытаний модульных узлов трения бортовых трибометров на лабораторной исследовательской установке УТИ-А в условиях вакуума и низких температур, а также на воздухе при нормальной температуре. Испытания проводились с целью отработки конструкции модульных узлов трения и корректировки КД по результатам испы-

Таблица 4. Модуль трения «подшипник скольжения»

Параметры	Модуль № 1	Модуль № 2
Материал вала	Сталь 09X16H4Б	Сталь 09X16H4Б
Материал втулки	Фторопласт Ф4М15	СКАМ- ИПМ 304
Нагрузка нормальная на пару трения, Н	1	1
Частота вращения вала, об/мин	75	75
Количество пар трения в модуле	4	4
Температура начальная, °С	20	20
Давление окружающей среды, Па	0.02	0.02
Продолжительность непрерывной работы, ч	6	5
Продолжительность периода приработки, мин	5	4.5
Коэффициент трения:		
приработка	0.35	0.2
установившийся режим	0.40	0.12

таний. Программа составлена с учетом требований ТЗ на разработку научной аппаратуры «Трение».

Объектами испытаний являются модульные узлы трения с различными кинематическими схемами (вал-втулка, подшипник качения, зубчатая передача; табл. 4–6):

- модуль для испытания подшипников скольжения (рис. 3, а);
- модуль для испытания подшипников качения (рис. 3, б);
- модуль для испытания зубчатых передач (рис. 4).

Таблица 5. Модуль трения «подшипник качения» (шарикоподшипник радиальный, однорядный)

Параметры	Модуль № 3
Кинематическая схема пары трения	
Марка подшипника	1000095Ю
Вращающееся кольцо	Внутреннее
Нагрузка радиальная, Н	2.5
Частота вращения образца-вала, об/мин	75
Количество пар трения в модуле	4
Температура образцов, начальная, °С	20
Давление окружающей среды, Па	0.02
Продолжительность непрерывной работы, ч	5
Продолжительность периода приработки, мин	Нет
Коэффициент трения (установившийся режим)	0.017

Таблица 6. Модуль трения «зубчатая передача» (контакт по линии, качение с проскальзыванием)

Параметры	Модуль № 4
Материал ведомой шестерни	Сталь 09X16H4Б
Материал сателлитных шестерен (6 шт.)	Сталь 09X16H4Б
Контактное напряжение не более, МПа	800
Частота вращения сателлитных шестерен, об/мин	300
Количество пар трения в модуле	6
Температура начальная, °С	20
Давление окружающей среды, Па	0.02
Продолжительность непрерывной работы, ч	6
Момент сопротивления, н·см	2

В процессе испытаний модульного узла трения «зубчатая передача» было установлено, что время работы модуля может значительно превысить заданный ресурс работы в 5 ч. Однако для уменьшения потребляемой мощности необходимо доработать технологию изготовления зубчатой пары.

Результаты ресурсных испытаний, приведенные в табл. 2 и 3, подтвердили ресурс работы макетов модульных узлов трения, необходимый для проведения КЭ «Материал — Трение».

1. Боровик В. Г. Модульный узел трения «диск-индентор» для триботехнических исследований в космическом пространстве // *Космічна наука і технологія*. — 2005. — 11, № 5/6. — С. 87–91.
2. Боровик В. Г., Боровик Д. В., Грудина Т. В. и др. Измерения износа в процессе испытаний пар трения по программе КЭ «Материал–Трение» // Тез. докл. 7-й Укр. конф. по космич. исслед., 3–8 сентября 2007 г. — Евпатория: НЦУИКС, 2007. — С. 120–121.
3. Боровик В. Г., Боровик Д. В., Колотило А. Д. и др. Установка для испытаний модульных трибометров и пар трения по программе подготовки КЭ «Материал–Трение» // Тез. докл. 6-й Укр. конф. по космич. исслед., 3–10 сентября 2006 г. — Евпатория: НЦУИКС, 2006. — С. 89.
4. Боровик В. Г., Гамуля Г. Д., Еланский Ю. А. и др. Комплект модульных трибометров для проведения экспериментов на беспилотных космических аппаратах // Тез. докл. 7-й Укр. конф. по космич. исслед., 3–8 сентября 2007 г. — Евпатория: НЦУИКС, 2007. — С. 127.
5. Броневец М. А., Гамуля Г. Д., Еланский Ю. А. и др. Орбитальный трибометр и новые материалы для проведения КЭ «Материал–Трение» // *Космічна наука і технологія*. — 2003. — 9, № 5/6. — С. 40–46.
6. Броневец М. А., Косторнов А. Г., Митрофанов В. Д., Фролов Г. А. Космическое материаловедение: перспективы использования материалов для узлов трения космических аппаратов // Тез. докл. 5-й Укр. конф. по космич. исслед., 4–11 сентября 2005 г. — Евпатория: НЦУИКС, 2005. — С. 112.
7. Броневец М. А., Косторнов А. Г., Скороход В. В. и др. Материалы для подвижных сопряжений космической техники // 3-я Международ. конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях»: Тр. конф. — Кацивели, Крым, 2004. — С. 528–529.
8. Введенский Ю. В., Гаврилов Р. В., Гамуля Г. Д. и др. Фрикционное поведение и износостойкость материалов и покрытий, перспективных для использования в условиях вакуума и криогенных температур // 3-я Международ. конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях»: Тр. конф. — Кацивели, Крым, 2004. — С. 247–248.
9. Гамуля Г. Д., Островская Е. Л., Юхно Т. П. Исследование триботехнических свойств материалов, предназначенных для работы в экстремальных условиях // Порошковая металлургия. — 2001. — № 3/4. — С. 47–57.
10. Гамуля Г. Д., Островская Е. Л., Юхно Т. П. и др. Разработка бортовых трибометров для космического эксперимента «Материал–Трение» // Тез. докл. 5-й Укр. конф. по космич. исслед., 4–11 сентября 2005 г. — Евпатория: НЦУИКС, 2005. — С. 116.
11. Гамуля Г. Д., Скороход В. В., Солнцев В. П., Сурду М. Н. Разработка научной аппаратуры и антифрикционных материалов нового поколения для проведения космического эксперимента «Материал–Трение» // Сб. тез. докл. 2-й укр. конф. по перспект. космич. исслед. — Кацивели, 2002. — С. 14.
12. Гамуля Г. Д., Скороход В. В., Солнцев В. П. и др. Разработка научной аппаратуры и антифрикционных материалов нового поколения для проведения космического эксперимента «Материал–Трение» // *Космічна наука і технологія*. — 2002. — 8, № 5/6. — С. 28–34.
13. Косторнов А. Г., Фушич О. И., Чевычелова Т. М. Новые самосмазывающиеся композиционные материалы для узлов трения космической техники // 3-я Международ. конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях»: Тр. конф. — Кацивели, Крым, 2004.
14. Островская Е. Л., Юхно Т. П., Гамуля Г. Д. и др. Влияние вакуума и низких температур на антифрикционное поведение самосмазывающихся антифрикционных материалов // Международ. конф. «Современное материаловедение, достижения и проблемы». — Киев, 2005.
15. Островская Е. Л., Юхно Т. П., Гамуля Г. Д. и др. Космический эксперимент «Материал–Трение»: Триботехнические исследования антифрикционных материалов в наземных лабораторных условиях // Тез. докл. 5-й Укр. конф. по космич. исслед., 4–11 сентября 2005 г. — Евпатория: НЦУИКС, 2005. — С. 366–367.
16. Скороход В. В., Косторнов А. Г., Фролов Г. А. Подготовка космических экспериментов «Материал–Трение» и «Трубка» для исследования антифрикционных материалов и тепловых труб на борту РС МКС // *Космічні дослідження в Україні 2002–2004 рр.* — Київ: НКАУ, 2004. — С. 71–76.
17. Скороход В. В., Фролов Г. А. Наземные исследования материалов для ракетно-космической техники 2000–2002 г. // *Космічні дослідження в Україні*. — Київ: НКАУ, 2002. — С. 77–84.
18. Сурду М. Н., Ламеко А. Л., Гамуля Г. Д. и др. Быстродействующая система измерений триботехнических

- параметров пар трения для КЭ «Материал–Трение» // Тез. докл. 6-й Укр. конф. по космич. исслед., 3–10 сентября 2006 г. — Евпатория: НЦУИКС, 2006. — С. 90.
19. Сурду М. Н., Ламеко А. Л., Фролов Г. А., Гамуля Г. Д. Разработка принципов измерения износа зубьев и построения измерительной системы для КЭ «Материал–Трение» // Тез. докл. 7-й Укр. конф. по космич. исслед., 3–8 сентября 2007 г. — Евпатория: НЦУИКС, 2007. — С. 133.
20. Yarosh V. M., Moishchev A. A., Bronovets M. A., Lopatin A. S. Investigation of the hard lubrication coatings in open space around Moon // Abstracts of papers from World Tribology Congress, London, 8–12 Sept. 1997. — London: Publ. MEP, 1997. — P. 512.

Поступила в редакцию 03.03.09

*G. D. Gamulja, G. A. Frolov,
A. D. Kolotilo, D. V. Borovik*

SET OF MODULAR
FRICTION UNITS FOR THE SPACE
EXPERIMENT «MATERIAL–FRICTION»
AND SOME RESULTS OF THEIR TESTING

The state of the preparation of the scientific equipment for realization of the space experiment «Material–Friction» is considered. The complete set of modular knots of friction under circuit designs «disk-indentor», «shaft-plug», «rolling bearing», and «gearing» is presented. Our results of the investigation of working capacity of the complete set of modular knots of friction gained in the atmosphere and vacuum with the use of various pairs of friction are given.