

УДК [621.822.6]

На правах рукописи

ШИШУРИН Александр Владимирович

НАУЧНО ОБОСНОВАННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО  
ОБЕСПЛЕЧЕНИЮ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СФЕРИЧЕСКИХ  
ШАРНИРНЫХ ПОДШИПНИКОВ МЕХАНИЗМОВ ПРИВОДА  
УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ  
УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Специальность 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов

и детали машин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва-2018

Работа выполнена в Акционерном обществе «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения» (АО «ВПК «НПО машиностроения»)

**Научный  
руководитель:**

**Маслов Александр Иванович,**  
доктор технических наук, заместитель  
руководителя службы качества АО «ВПК  
«НПО машиностроения»

**Официальные  
оппоненты:**

**Соболев Яков Алексеевич,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Обработка материалов давлением  
и аддитивные технологии» ФГБОУ ВО  
«Московский Политех»

**Георгиевский Владимир Павлович,**  
доктор технических наук, главный научный  
сотрудник АО «Корпорация «Московский  
институт теплотехники»

**Ведущая  
организация:**

Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Всероссийский научно-  
исследовательский институт авиационных  
материалов»

Защита диссертации состоится «\_\_\_» 2018 г. в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская улица, д. 5., стр.1. Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью, просим направлять ученым секретарю диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ([www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)) Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «\_\_\_» 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, доктор технических наук,

профессор

Е.Б. Сарач

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы** В представленной диссертационной работе проведено широкое экспериментальное исследование работоспособности сферических шарнирных подшипников (СШП) при реальных условиях эксплуатации летательных аппаратов (ЛА) с использованием различных материалов и твердосмазочных покрытий (ТСП). По результатам испытаний отобраны наиболее перспективные виды материалов корпусов подшипников и покрытий, отвечающие требованиям сохранения высокой износостойкости, стабильности механических свойств, отсутствия скрежетания и высоких антифрикционных характеристик. Отсутствие теоретических и экспериментальных данных параметров эксплуатации, применительно к СШП в экстремальных условиях работы, актуализировало необходимость разработки методики экспериментального исследования, а также создания стендового оборудования, имитирующего реальные условия эксплуатации СШП. Работоспособность СШП в большей мере зависит от параметров упруго-пластических деформаций опорных узлов механизмов приводов управления. Предложен инженерный подход для расчета напряженно-деформируемого состояния опорного узла привода с учетом влияния пластических деформаций и определения остаточных напряжений. Для определения ресурса работы СШП с композиционными ТСП были проведены испытания при изменении внешнего воздействия с учетом изгибающих моментов, которые позволили оценить влияние на протекающие процессы в подшипниках силовой нагруженности: температур, рабочей среды, скорости скольжения.

**Объектом исследования** являются СШП механизмов привода управления ЛА.

**Предметом исследования** является работоспособность СШП, определяемая физико-механическими процессами, происходящими в

опорных узлах привода управления ЛА при экстремальных условиях эксплуатации.

**Область исследования.** Основные научные положения диссертации соответствуют следующим пунктам паспорта ВАК Минобрнауки РФ по специальности 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин»: 3. Теория и методы обеспечения надежности объектов машиностроения; 5. Повышение точности и достоверности расчетов объектов машиностроения; разработка нормативной базы проектирования, испытания и изготовления объектов машиностроения.

**Цель диссертационной работы** состоит в обеспечении работоспособности СШП опорных узлов механизмов управления ЛА при работе в экстремальных условиях. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- 1) определение нагрузочных режимов СШП, действующих факторов и условий работы механизма привода управления, возникающих в реальных условиях;
- 2) разработка стендового оборудования, имитирующего реальные условия полета ЛА и позволяющего проводить широкие исследования и испытания опорных узлов механизмов управления и СШП;
- 3) разработка методики испытаний СШП в режимах постоянного и циклического изменения действующих факторов (температура, радиальная нагрузка, угол качания);
- 4) определение критериев работоспособности СШП;
- 5) разработка научно обоснованных технических решений по обеспечению работоспособности СШП механизмов привода управления ЛА для экстремальных условий эксплуатации.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе использованы методы автоматизированного проектирования, теоретической механики и компьютерного моделирования.

**Достоверность**                   **обеспечивается**                   непротиворечивостью общепризнанным теориям, применением апробированных математических и компьютерных моделей, созданных при помощи современных средств инженерного анализа и результатами опытно-промышленных испытаний.

**Научная новизна.** В диссертации получены следующие новые научные результаты, выносимые на защиту:

- подход к определению предельной нагрузки опорного узла привода механизма управления, отличающийся тем, что позволяет учитывать упруго-пластический характер поведения основных элементов конструкции, а также способствует обоснованному выбору материалов и покрытий, геометрических размеров и компоновки, для обеспечения работоспособности механизма привода управления в условиях полета ЛА;
- разработанное уникальное стендовое оборудование, имитирующее реальные условия полета ЛА, отличительной особенностью которого является возможность проведения комплексных исследований работоспособности опорных шарнирных узлов и СШП;
- методика испытаний СШП, позволяющая впервые оценить влияние изменения действующих факторов (температура, коэффициент трения, радиальная нагрузка, силовой износ покрытия, диаметральный зазор) на работоспособность механизма привода ЛА в целом.

**Практическая значимость** работы заключается в:

- возможности использования разработанной конструкции приводуправления, осуществляющих работу, согласно патентно-защищенному способу, конструкция которых содержит сферические шарнирные подшипники;
- возможности оценки напряжений и деформаций при сложном напряженном состоянии шарнирного узла привода управления, которая достигается предложенным алгоритмом расчета;
- обеспечение работоспособности механизма привода элевона за счет использования подобранных материалов, апробированных ТСП с заданными

толщинами, а также технологии их изготовления;

- создании стендового оборудования, позволяющего проводить широкие исследования и испытания сферических шарнирных подшипников в экстремальных условиях эксплуатации;
- разработке, защищенных патентами, устройств шарнирных узлов трения для повышения работоспособности.

**Внедрение результатов работы** осуществляется в рамках научно-исследовательских работ в АО «ВПК «НПО машиностроения», а также в рамках перспективного научно-технического сотрудничества АО «ВПК «НПО машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана и ФГУП «ВИАМ».

### **Апробация результатов работы**

Результаты диссертационной работы докладывались на научно-технических семинарах АО «ВПК «НПО машиностроения» (Реутов, 2012-2016); 5-й Всероссийской научно-технической конференции (Москва, 2008); 4-й Российской научно-практической конференции (Рыбинск, 2013); XXXVIII Академических чтений по космонавтике (Реутов, 2014); XL Академических чтений по космонавтике (Реутов, 2016).

### **Публикации**

Результаты диссертации отражены в 6 научных статьях, в том числе в 5 статьях из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, опубликованы тезисы 3 докладов, общим объемом 2,1п.л., получено 9 патентов РФ на изобретения.

### **Личный вклад соискателя**

Все исследования, представленные в диссертационной работе, выполнены лично соискателем в процессе работы над материалами диссертации. Материал, включенный в диссертацию из совместных публикаций, принадлежит непосредственно соискателю, заимствованный материал обозначен ссылками.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка

литературы, списка основных сокращений и обозначений. Диссертационная работа изложена на 107 страницах, содержит 55 иллюстраций и 4 таблицы. Библиография включает 82 наименования

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследований, отмечены научная новизна, практическая значимость и внедрение результатов работы, сформулированы положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** проведен анализ требований, предъявляемых к шарнирным узлам привода, работающих в экстремальных условиях, в ходе которого определены его общие задачи. Показаны условия работы шарнирных подшипников и рассмотрены материалы для подшипников скольжения, работающих в экстремальных условиях. Проанализированы износостойкие покрытия, твердые смазочные материалы и композиционные порошковые антифрикционные материалы. По результатам обзора предложены рекомендации по защитным покрытиям, обеспечивающим работоспособность СШП с низким коэффициентом трения и малым износом при воздействии высоких и низких температур, высоких нагрузок, при работе как в воздушной среде, так и в вакууме. Анализ работ отечественных и зарубежных ученых в области материаловедения и деталей машин (Ю.Н. Дроздов, А.И. Герман, Л.А. Чатынян, Д.Б. Пармузин и др.) позволил выделить основные направления в области конструирования и технологии сферических шарнирных подшипников, используемых в качестве основных элементов конструкции опорных узлов механизма привода. На основании выводов, сделанных из проведенного анализа, определены цель и задачи, сформулированные ранее.

**Во второй главе** представлены методы для определения напряжений и деформаций деталей опорного узла трения на примере механизма привода управления ЛА в упругой и упруго-пластической области деформаций

(Рис. 1, 2), а также показана методика испытаний СШП механизма привода управления ЛА (Рис.3).

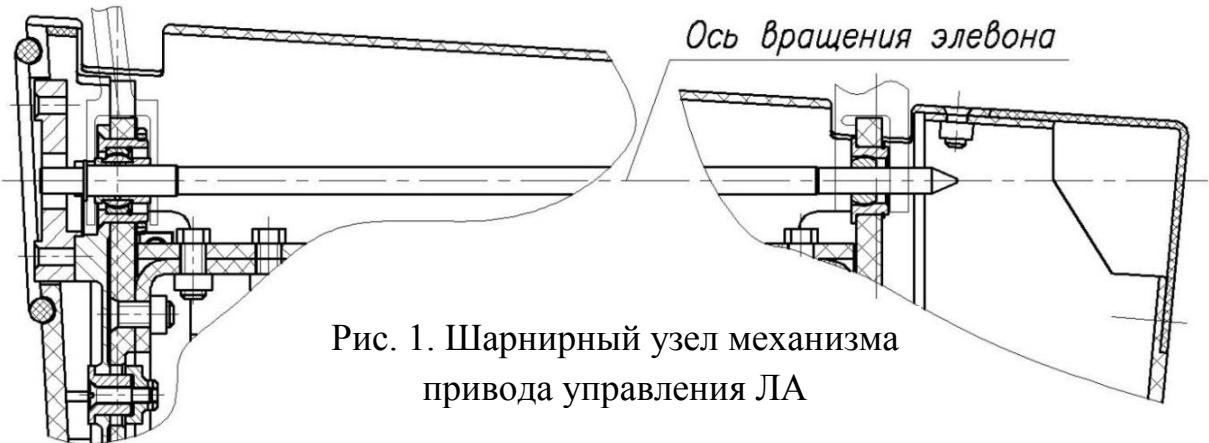


Рис. 1. Шарнирный узел механизма привода управления ЛА

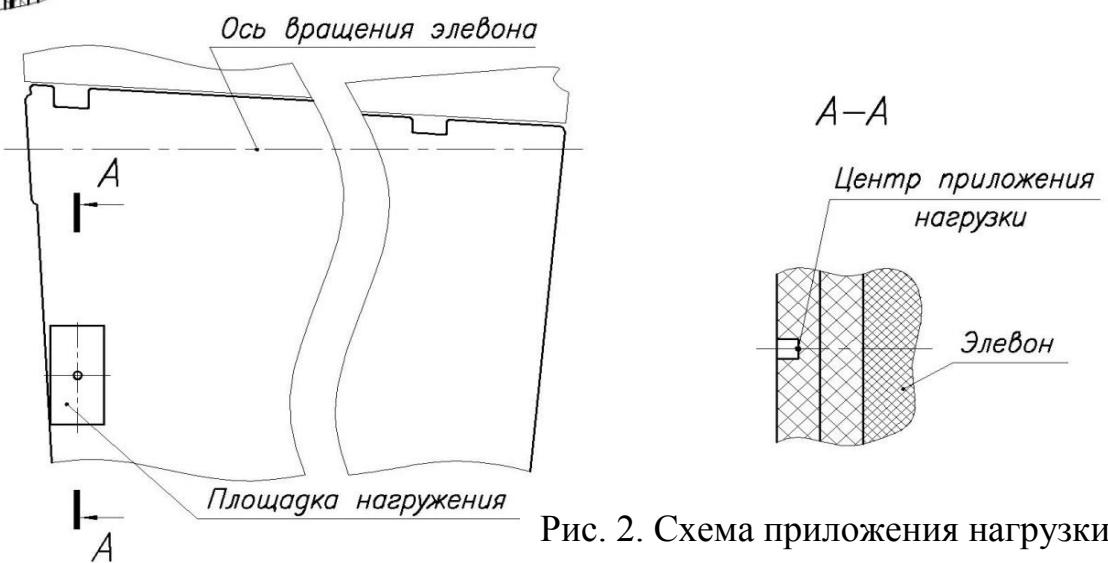


Рис. 2. Схема приложения нагрузки

Разработка оптимальных конструкций СШП в механизме привода управления ЛА проводилась с учетом испытаний конкретного ЛА.

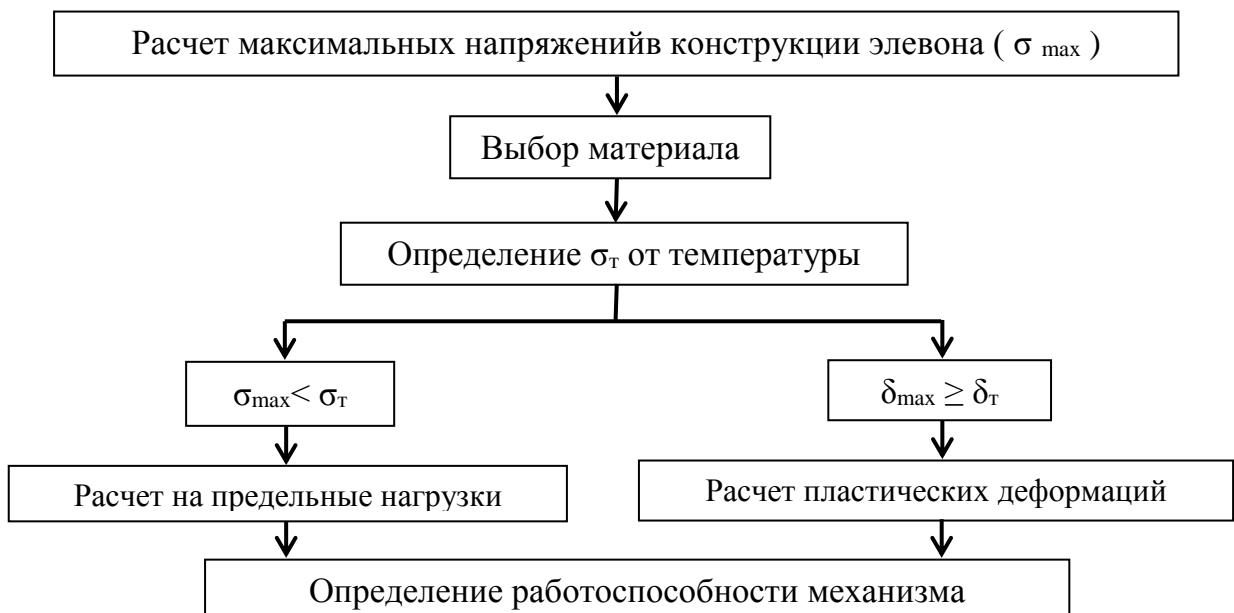


Рис.3 Определение работоспособности СШП механизма привода управления

Для проведения испытаний применялись имитаторы оси вращения элевона (Рис. 1). Условия проведения испытаний отражены в Таблице 1 и представлены в виде графиков (Рис. 4, 5, 6).

Таблица 1

Действительные значения параметров

Угол, °	Максимальная нагрузка, Н	Частота качаний, Гц	Количество качаний	T, °C
±5	6200	2	200	30
±3	6200	2,5	3550	900
±10	7200	1	10	1050
±5	6500	2	40	1050
±2	5800	4,32	950	1050

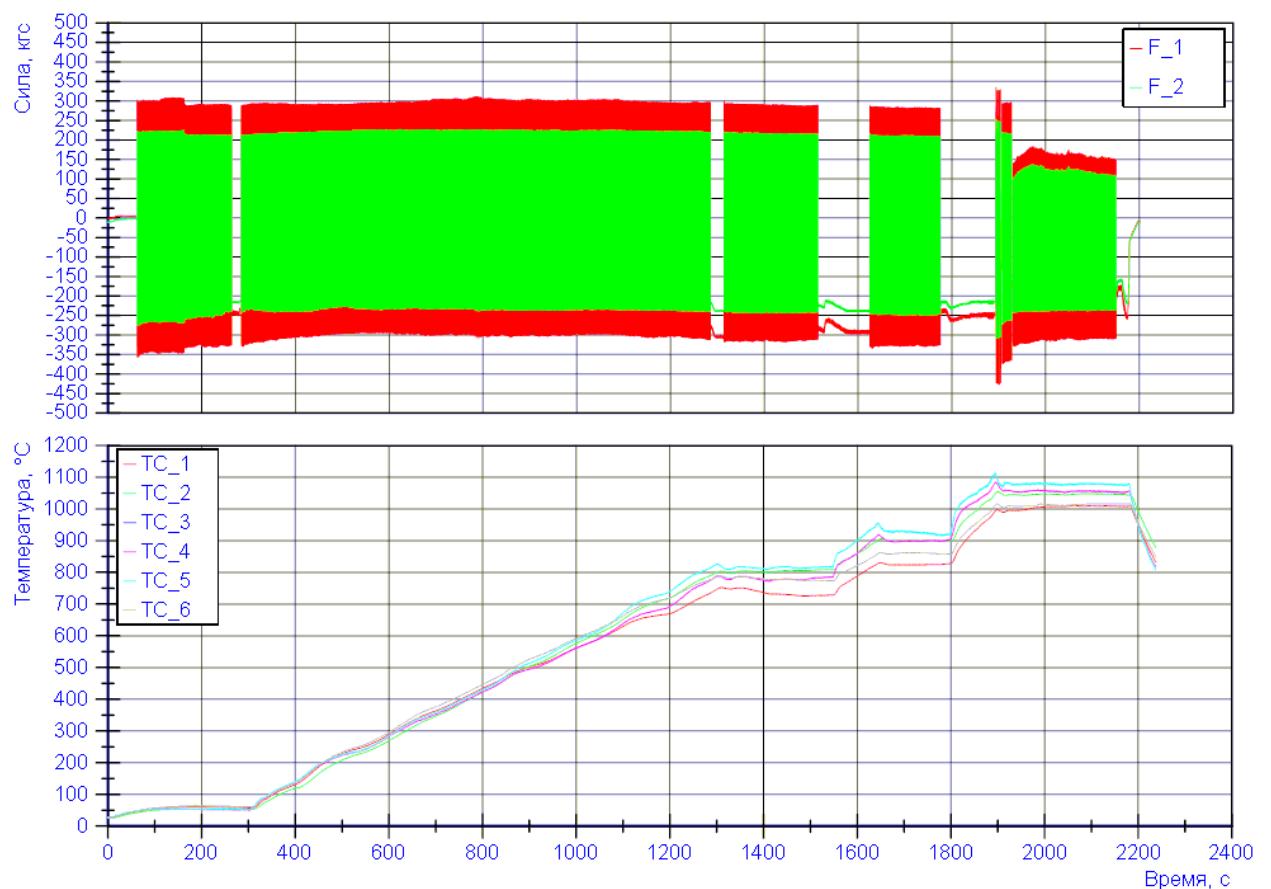


Рис. 4. Величины нагрузок в интервале с 0 до 2200 с

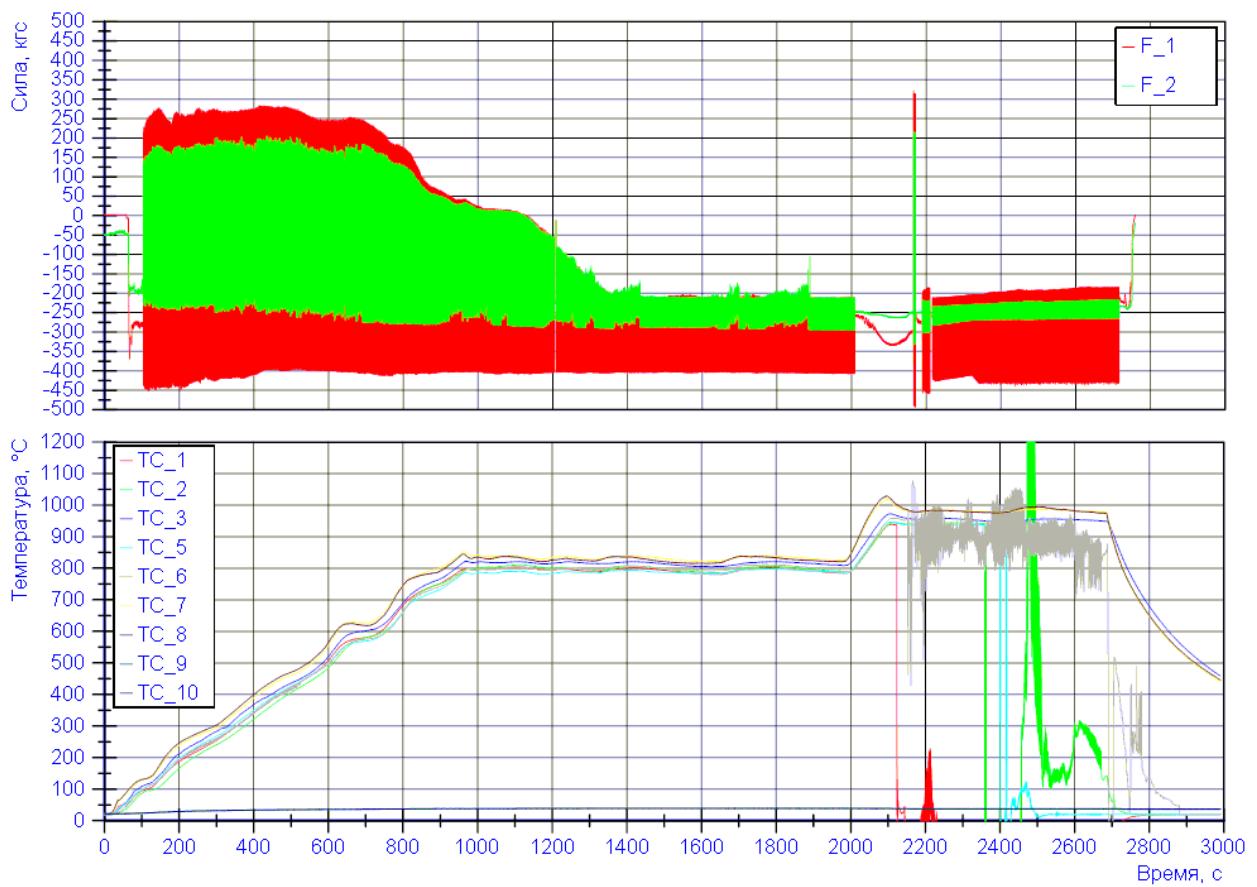


Рис. 5. Величины нагрузок в интервале с 0 до 3000 с

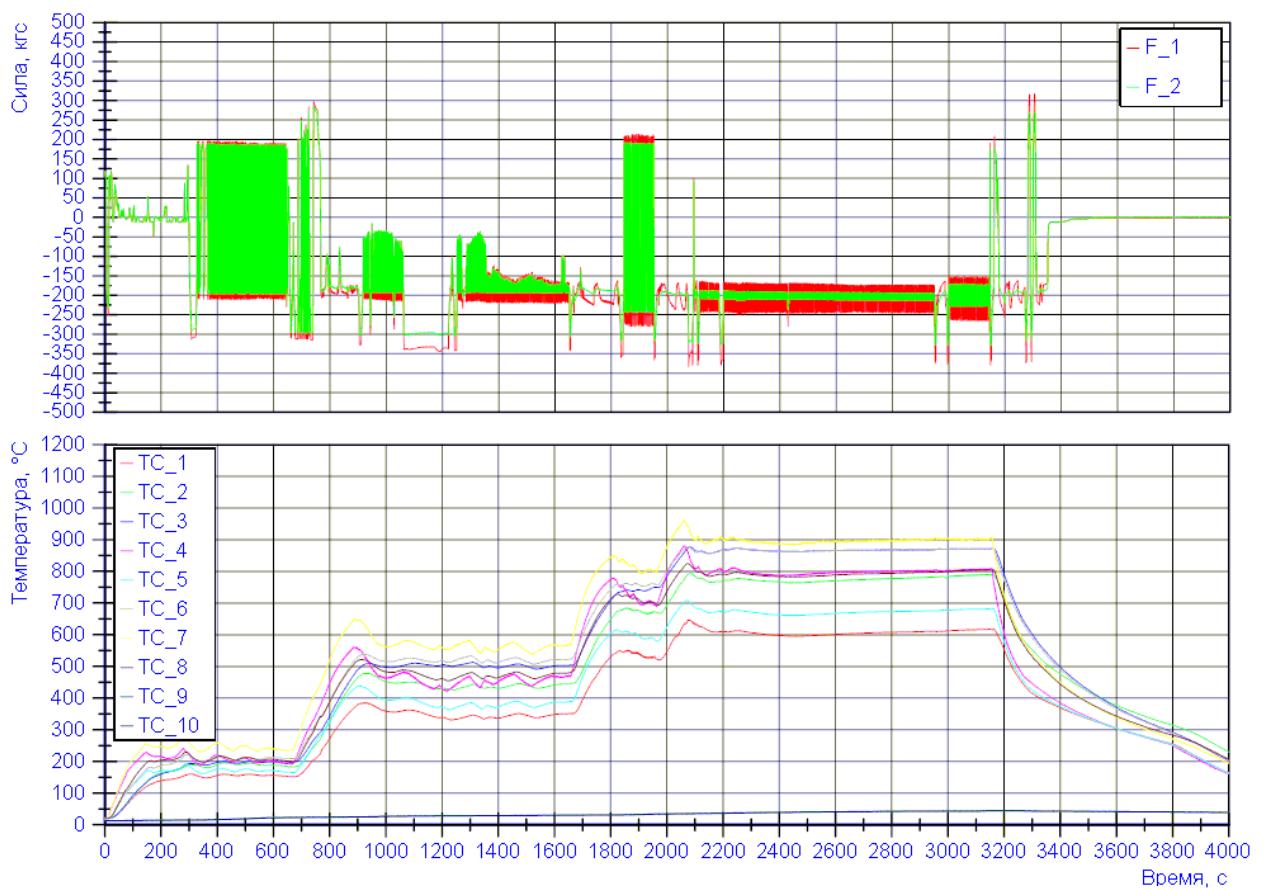


Рис. 6. Величины нагрузок в интервале с 0 до 4000 с

**В третьей главе** описано испытательное оборудование и методика экспериментальных исследований СШП.

Стенд автономных испытаний, разработанный в АО «ВПК «НПО машиностроения», позволил провести серию испытаний по оценке работоспособности СШП с различными видами ТСП (Рис. 7).

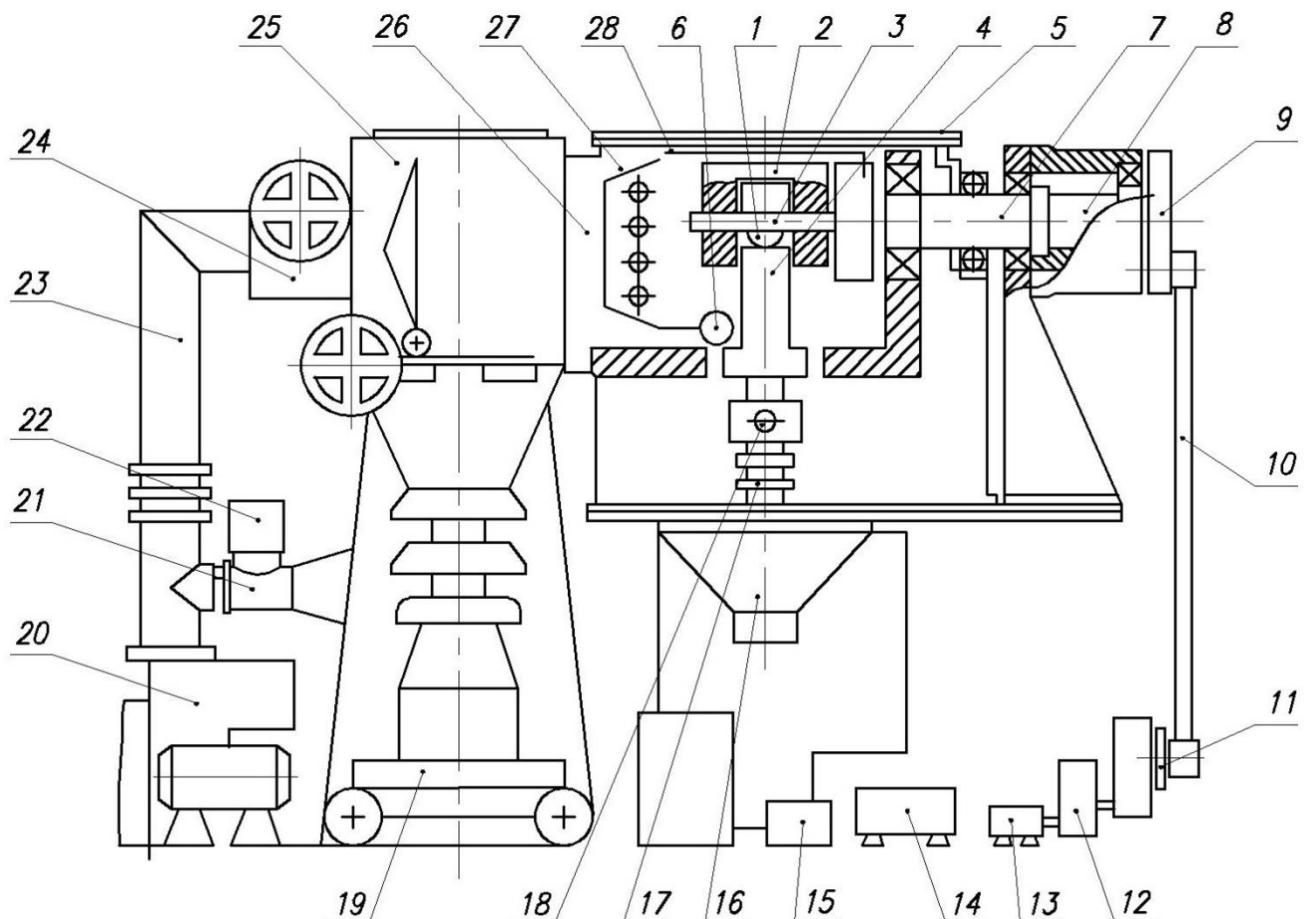


Рис. 7. Общая компоновка стенда

1 – испытуемый подшипник; 2 – проушина; 3 – ось; 4 – серьга;  
 5 – крышка вакуумной камеры; 6 – кварцевые галогенные лампы;  
 7 – приводной вал; 8 – тензометрический торсион; 9...11 – кривошипно-коромысловый механизм; 12 – редуктор; 13 – двигатель постоянного тока;  
 14...18 – гидравлическая система нагружения; 19...25 – система вакуумной откачки и коммутации; 26 – вакуумная камера; 27 – нагревательная камера;  
 28 – охлаждаемый защитный экран.

Требования к нагрузкам и движению в подшипниках предопределяет наличие опор в испытательных стенах, что вызывает затруднения в экспериментальной оценке моментов и коэффициентов трения.

Неточность измерения моментов и коэффициентов трения складывается из следующих погрешностей:

- 1) погрешностью, определяемой чувствительностью системы измерения, которая зависит от потерь на трение в статической тарировке измеряемого момента сопротивления и определяется минимально регистрируемым приложенным моментом;
- 2) погрешностью грузов, испытуемых при тарировке;
- 3) погрешностью измерения длины плеча, на котором определяется момент.

На Рис. 8, 9 приведены зависимости коэффициентов трения от времени работы подшипников с различными ТСП.

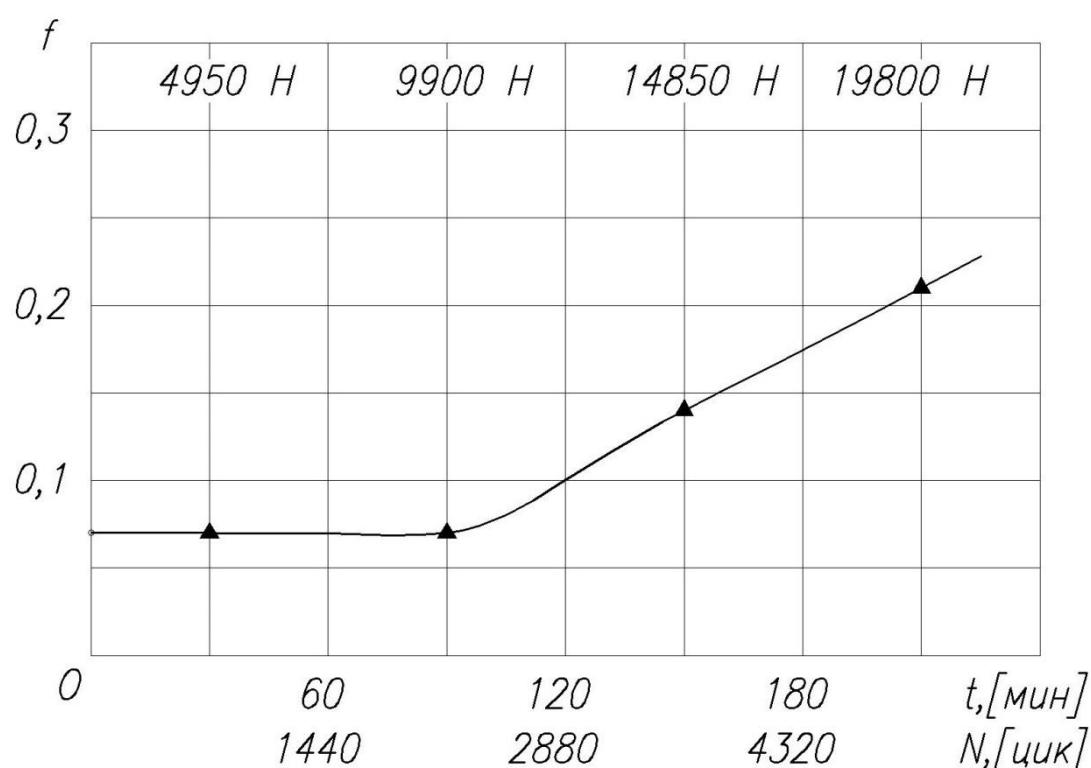


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения от числа циклов качаний и времени работы подшипника с покрытием №4 при температуре 1373К и ступенчатом повышении нагрузки

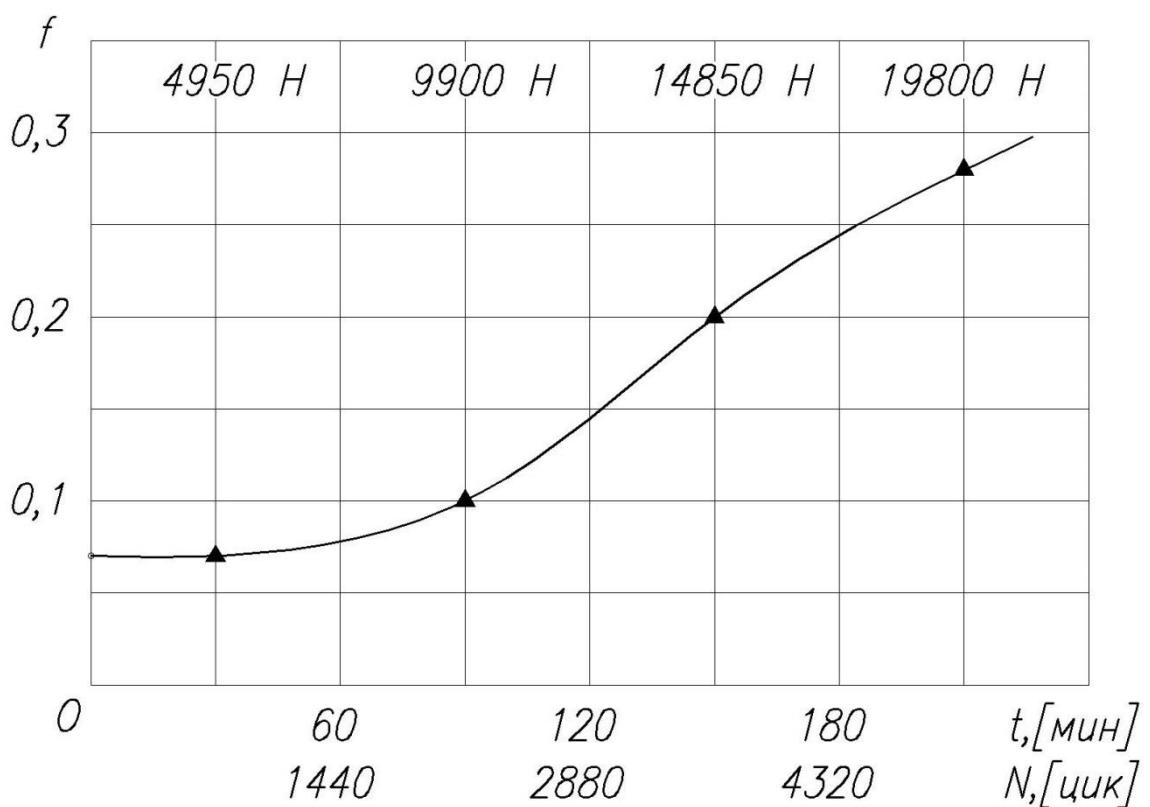


Рис. 9. Зависимость коэффициента трения от числа циклов качаний и времени работы подшипника с покрытием №6 (дисульфид вольфрама, фторид кальция, оксид титана) при температуре 1373К и ступенчатом повышении нагрузки

**В четвертой главе** содержатся расчеты СШП на долговечность, определение ресурса СШП с композиционными многослойными покрытиями, показана линейная зависимость изнашивания покрытий, а также приведены образцы испытуемых подшипников и материалов.



Рис. 10. Внешний вид СШП до начала испытаний

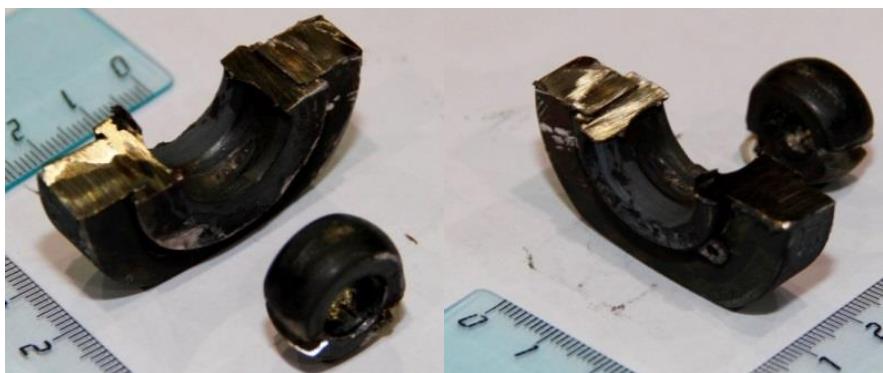


Рис. 11. Внешний вид СШП после испытаний

**Материал – сплав на никелевой основе ЭК-61, Ø оси – 10  
мм(ХН58МБЮД)**

Образец № 1. Покрытие (НП229) до 15 мкм.



Рис. 12. Микроструктура материала  
образца на участке отслоения покрытия  
Оптическое увеличение x 200

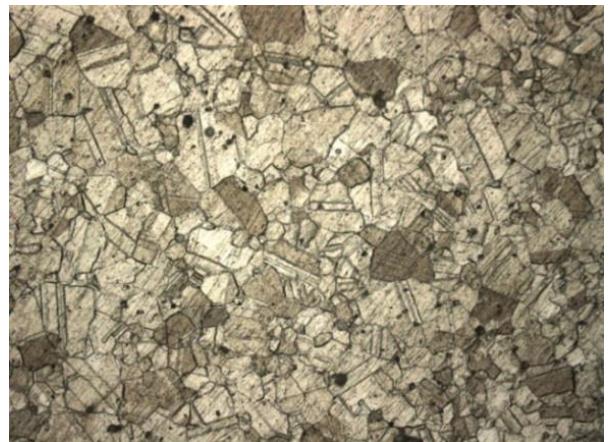


Рис. 13. Микроструктура материала  
образца в центре сечения.  
Оптическое увеличение x 200

Образец № 2. Покрытие (TiN+ CuC) толщиной до 10 мкм.

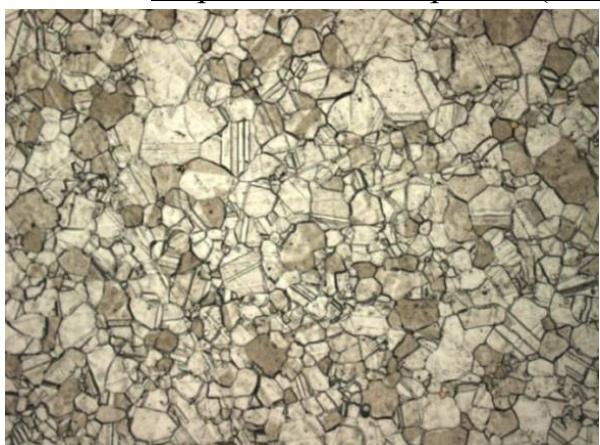


Рис. 14. Микроструктура материала  
образца в центре сечения.  
Оптическое увеличение x 200



Рис. 15. Микроструктура материала  
образца на участке покрытием.  
Оптическое увеличение x200

## **Выводы**

1. На основании результатов исследований определена конструкция СШП, обеспечивающая работоспособность ЛА в экстремальных условиях эксплуатации, за счет использования подобранных материалов, апробированных ТСП с заданными толщинами, а также технологий их изготовления.

2. Разработано и изготовлено уникальное стендовое оборудование, имитирующее реальные условия полета ЛА (стенд испытаний механизма привода управления; стенд автономных испытаний СШП).

3. На основе инженерного подхода предложен алгоритм расчета напряжений и деформаций при сложном напряженном состоянии шарнирного узла трения привода, учитывающий возникновение пластических деформаций, не приводящих к отказу механизма.

4. Разработана комплексная методика испытаний СШП при постоянных режимах и режимах циклического изменения действующих факторов в процессе работы: температур, рабочей среды и скорости скольжения.

5. Установлено, что влияющим фактором ограничивающим работоспособность СШП, является температура, определяющая долговечность покрытия и его антифрикционные свойства. Радиальная нагрузка в меньшей степени влияет на работоспособность.

6. Исходя из критерия отказа СШП по превышению коэффициентами трения эксплуатационной величины – 0,3, на основе комплексов, характеризующих влияние факторов на работу подшипника и ТСП, получены расчетные зависимости для определения работоспособности СШП.

7. Проведены испытания СШП с целью оценки работоспособности и антифрикционных характеристик различных видов ТСП, полученных по новым технологиям для работы в экстремальных условиях, а также покрытий выпускаемых серийно.

Наиболее работоспособными, для эксплуатации в экстремальных условиях, соответствует СШП с многослойным композиционным покрытием (сплав ВЖЛ-3 с диффузионным напылением TiN+CuC) на основе ЭК-61.

**Основные результаты диссертации отражены в работах:**

1. Исследование работоспособности шарнирных подшипников в экстремальных условиях /А.В. Шишурин [и др.] // Труды Всероссийской научно-технической конференции 10-12 октября 2008 г. Москва, 2008. С.81-93 (0,52 п.л. / 0,12 п.л.)

2. Исследование и разработка шарнирных подшипников для конструкций ЛА / А.В. Шишурин [и др.] // Научный сборник статей ОАО ВПК «НПО машиностроения. Реутов, 2012. № 2-6. С.25-33. (0,52 п.л. / 0,12 п.л.)

3. Оптимизация сферических шарнирных подшипников для конструкции ЛА / А.В. Шишурин [и др.] // Научный сборник статей ОАО ВПК «НПО машиностроения. Реутов, 2013.№ 1. С.30-46 (0,12 п.л.)

4. Предварительные результаты экспериментальных исследований эффекта увеличения импульса пульсирующего реактивного двигателя в вакууме / А.В. Шишурин [и др.] // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. Рыбинск, 2013. № 1. С.23-30 (0,52 п.л. / 0,12 п.л.)

5. Эффект увеличения импульса пульсирующего двигателя в вакууме и перспективы его применения / А.В. Шишурин [и др.] / Вестник. Российский транспорт // Новейшие энергетические установки в промышленности и на транспорте. Москва, 2014. № 2. С.35-44. (0,14 п.л.)

6. Определение напряжений и деформаций при сложном напряженном состоянии шарнирного узла привода элевона ЛА / А.В. Шишурин [и др.]/ Ракетные комплексы и ракетно-космические системы – проектирование, экспериментальная отработка, летные испытания, эксплуатация: Труды секции 22 имени академика В.Н. ЧеломеяXL Академических чтений по космонавтике. Реутов, 2016. С.161-170. (0,52 п.л. / 0,12 п.л.)

7. Шаровая опора: пат. 2574300 Рос. Федерации: МПК F16C11/06 /А.В. Шишурин [и др.], заявитель и патентообладатель Реутов, АО ВПК НПО машиностроения. - №2014140681; заявл. 09.10.2014, опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4, - 3с: ил. (0,12п.л.)

8. Шаровая опора: пат. 2579382 Рос. Федерации: МПК F16C11/06 /А.В. Шишурин [и др.], заявитель и патентообладатель Реутов, АО ВПК НПО машиностроения. - №2015103677; заявл. 09.10.2014, опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10, - 4с: ил. (0,15 п.л.)

9. Шаровая опора: пат. 2579418 Рос. Федерации: МПК F16C11/06 /А.В. Шишурин [и др.], заявитель и патентообладатель Реутов, АО ВПК НПО машиностроения. - №2015105667; заявл. 19.02.2015, опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10, - 3с: ил. (0,12п.л.)

10. Шаровая опора: пат. 2588362 Рос. Федерации: МПК F16C11/06 /А.В. Шишурин [и др.], заявитель и патентообладатель Реутов, АО ВПК НПО машиностроения. - №2015121528; заявл. 05.06.2015, опубл. 27.06.2016, Бюл. № 18, - 4с: ил. (0,15 п.л.)

11. Способ изготовления многослойных металлических панелей: пат. 2595193 Рос. Федерации: МПК B23K20/14 /А.В. Шишурин [и др.], заявитель и патентообладатель Реутов, АО ВПК НПО машиностроения. - №2015105668; заявл. 19.02.2015, опубл. 20.08.2016, Бюл. № 23, - 4с: ил. (0,15 п.л.)

12. Способ изготовления деталей из титановых сплавов: пат. 2613003 Рос. Федерации: МПК B23K20/14 /А.В. Шишурин [и др.], заявитель и патентообладатель Реутов, АО ВПК НПО машиностроения. - №2015141505; заявл. 30.09.2015, опубл. 14.03.2017, Бюл. № 8, - 3с: ил. (0,12п.л.)

13. Способ изготовления деталей из титановых сплавов: пат. 2614919 Рос. Федерации: МПК B23K20/14 /А.В. Шишурин [и др.], заявитель и патентообладатель Реутов, АО ВПК НПО машиностроения. - №2015146651; заявл. 29.10.2015, опубл. 30.03.2017, Бюл. № 10, - 3с: ил. (0,12п.л.)

14. Шаровая опора: пат. 2615024 Рос. Федерации: МПК F16C11/06 /  
А.В. Шишурин [и др.], заявитель и патентообладатель Реутов,  
АО ВПК НПО машиностроения. - №2016104640; заявл. 11.02.2016, опубл.  
03.04.2017, Бюл. № 10, - 4с: ил. (0,15п.л.)

15. Шаровая опора: пат. 2630346 Рос. Федерации: МПК F16C11/06 /  
А.В. Шишурин [и др.], заявитель и патентообладатель Реутов,  
АО ВПК НПО машиностроения. - №2016135508; заявл. 01.09.2016, опубл.  
07.09.2017, Бюл. № 25, - 5с: ил. (0,2 п.л.)

16. Шаровая опора: пат. 2634661 Рос. Федерации: МПК F16C11/06 /  
А.В. Шишурин [и др.], заявитель и патентообладатель Реутов,  
АО ВПК НПО машиностроения. - №2016141958; заявл. 26.10.2016, опубл.  
02.11.2017, Бюл. № 31, - 5с: ил. (0,2 п.л.)