

УДК 629.7.015.4

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-81-92

Методика оценки долговечности шарнирных подшипников

В.К. Харина¹, О.А. Ратенко¹, Г.Б. Варданян¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

Аннотация: В статье представлена усовершенствованная методика оценки долговечности шарнирных подшипников, работающих в условиях колебательных движений, основанная на обработке массива экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях, а также в процессе эксплуатации изделия. Был применен один из вариантов математического моделирования, который использует методы регрессии для аппроксимации функции одной переменной. В качестве объекта исследований рассматриваются шарнирные подшипники, установленные в системах управления самолетом (двигателем) и работающие при циклическом качательном движении. Шарнирные подшипники являются подшипниками скольжения, а амплитуда их качательных движений может изменяться в широком диапазоне от ± 20 до $\pm 60^\circ$. Проблемы расчета долговечности подшипников скольжения достаточно хорошо изучены и задокументированы в соответствующих стандартах: ГОСТ 1144-75 «Подшипники качения. Методы расчета долговечности»; ГОСТ 15084-78 «Подшипники скольжения. Методы расчета долговечности». Шарнирные подшипники являются подшипниками скольжения, но в то же время существует множество технических решений, в которых подшипники работают в условиях колебательных движений, например в узлах приводов закрылков, в системах управления самолетом и т. д. Особенности условий эксплуатации обуславливают специфические виды дефектов, выявленные при экспериментальных исследованиях. Показано, что известные методы расчета долговечности подшипников скольжения не позволяют получать приемлемые практические результаты при оценке долговечности подшипников, работающих при циклическом качательном движении.

Ключевые слова: шарнирные подшипники, методы расчета долговечности, оценка работоспособности, экспериментальные исследования, усталостные разрушения.

Для цитирования: Харина В.К., Ратенко О.А., Варданян Г.Б. Методика оценки долговечности шарнирных подшипников // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 2. С. 81–92. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-81-92

Methodology for assessing the spherical plain bearings durability

V.K. Harina¹, O.A. Ratenko¹, G.B. Vardanyan¹

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: The article presents an improved method for assessing the durability of spherical plain bearings, operating under the conditions of oscillatory motion, based on the processing of an array of experimental data obtained in laboratory conditions as well as during operation of the product. One of the options of mathematical modeling was applied, which uses regression methods to approximate the function of one variable. As an object of research, spherical plain bearings installed in aircraft (engine) control systems and operating in cyclic rocking motion are considered. Spherical bearings are plain bearings, and the amplitude of their rocking movements can vary over a wide range from $\pm 20^\circ$ to $\pm 60^\circ$. The problems of calculating the service life of plain bearings are well studied and documented in the relevant standards GOST 1144-75 “Rolling bearings. Methods for calculating durability”, GOST 15084-78 “Plain bearings. Methods for calculating durability”. Spherical bearings are plain bearings, but at the same time, there are many technical applications in which bearings operate under conditions of oscillatory motion, for example, in flap drive units, in aircraft control systems, etc. Features of operating conditions determine the specific types of defects identified in experimental studies. It is shown that the known methods for calculating the durability of plain bearings do not allow obtaining acceptable practical results in assessing the service life of bearings operating in cyclic rocking motion.

Key words: spherical bearings, methods for calculating durability, assessment of working efficiency, experimental research, fatigue damage.

For citation: Harina, V.K., Ratenko, O.A., Vardanyan, G.B. (2025). Methodology for assessing the spherical plain bearings durability. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 2, pp. 81–92. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-81-92

Введение

Подшипники скольжения находят широкое применение в различных областях техники, в том числе в авиационной технике [1]. Они относятся к категории особо ответственных узлов, долговечность которых в значительной степени определяет долговечность изделия в целом [2]. Вопросы долговечности подшипников скольжения достаточно хорошо изучены и задокументированы в соответствующих стандартах [3]. Однако большинство проведенных исследований относятся к подшипникам, работающим в условиях непрерывного вращения. В ряде конструкций, например в системах управления самолетом и двигателем, подшипники работают в условиях колебательного движения. Известные методы расчета долговечности таких подшипников не позволяют получать приемлемые практические результаты.

В настоящей работе на основании обработки и анализа результатов экспериментальных исследований шарнирных подшипников в лабораторных условиях, а также в составе изделий в процессе эксплуатации была разработана методика оценки долговечности подшипников скольжения, работающих при качательном движении. Подвижное соединение реализуется при взаимном колебательном перемещении одного кольца подшипника относительно другого. Угол смещения одного кольца подшипника относительно другого является наибольшим допустимым углом между осями колец подшипника. С учетом действия внешней нагрузки и условий работы подшипников приводятся формулы для предварительного расчета количественных показателей долговечности подшипников, совершающих качательные движения при разных углах качания (от ± 20 до $\pm 60^\circ$) [3].

Объект испытаний и методология исследований

Теоретической основой расчета подшипников на усталостную прочность является теория Герца [4]. При расчете подшипников на долговечность также учитываются характеристики усталостной прочности материалов, которые определяются экспериментальным путем. Долговечность имеет большее рассеяние, чем многих других агрегатов. Это связано в основном с локальным характером распределения напряжений и использованием в подшипнике значительного числа взаимодействующих между собой деталей.

Расчет подшипников на долговечность базируется на вероятностно-статистических методах [5]. Долговечность можно определить как время работы в часах, в течение которого не менее 90 % определенной группы подшипников, эксплуатируемых в одинаковых условиях, должны проработать без проявления признаков усталости металла [6]. Статистическое распределение долговечности согласуется с концепцией усталостного разрушения металла, базирующейся на дислокационной теории А.И. Спришевского.

Необходимо обратить внимание на то, что на долговечность подшипников также оказывают влияние такие факторы, как смазка, шероховатость контактных поверхностей, точность изготовления деталей и т. д. В подшипниках качения [7–10] при достаточной смазке и правильном монтаже износ не обнаруживается даже при продолжительной работе, но по истечении определенной наработки подшипника, зависящей от значений нагрузки и числа оборотов или качаний, на рабочих поверхностях возникают усталостные повреждения – сначала в виде рисок, затем появляется шелушение и выкрашивание. Начальные риски чаще всего вызываются неоднородностью материала.

В качестве объекта исследований рассматриваются шарнирные подшипники Ш6, Ш15, Ш20, Ш25 и их модификации (рис. 1). Испытания проводились в эксплуатационных условиях и на испытательных стендах с целью установления фактической долговечности подшипников данного вида. Обычно испытания в эксплуатационных условиях достаточно затруднительны, в связи с тем что необходимо учитывать монтаж, количество масла, конструктивные особенности и т. д. Испытательные стенды дают возможность проводить испытания в широких диапазонах режимов, моделирующих эксплуатационные. Методика

исследования определяет предварительные действия, условия проведения испытаний, обработку и анализ результатов испытаний.

Методика предполагает испытания трех видов.

Полные испытания на долговечность, в результате которых уточняется соответствие параметров и коэффициентов работоспособности подшипников данных типоразмеров. Были отобраны шарнирные подшипники, изготовленные в соответствии с ЕТУ 100 или ГОСТ 3635-78 [11].

Контрольные замеры для оценки соответствия качества продукции подшипниковых заводов. Для контрольных замеров использовались подшипники со сборки, часть подшипников разбирали, проводили металлографический анализ, проверяли отсутствие ожогов и трещин.

Испытания для проверки материалов и технологических особенностей.

Результаты исследований

В процессе работы проводились экспериментальные исследования шарнирных подшипников в лабораторных условиях, на испытательных стендах и в составе изделий авиационной техники. В частности, подшипники Ш6 работали в узлах стопор-ограничителя в поводке управления двигателя, а подшипники Ш15 были установлены в узлах навески двигателя.

На первом этапе проводился анализ повреждений элементов конструкции подшипников в процессе их испытаний [11, 12]. Так, сферические поверхности колец подшипников Ш6 при наработке 2 087–2 291 ч в зоне нагружения имеют оплавление и выработку металла (рис. 2, 3).

Рабочие поверхности внутренних и наружных колец подшипников имеют пригар смазки и выработку металла в виде глубоких раковин глубиной до 0,2 мм. На внутренних кольцах имеется износ в виде смятия металла глубиной до 0,3 мм. До 50 % поверхности колец всех подшипников покрыты слоем коррозии глубиной до 0,5 мм (рис. 4, 5).

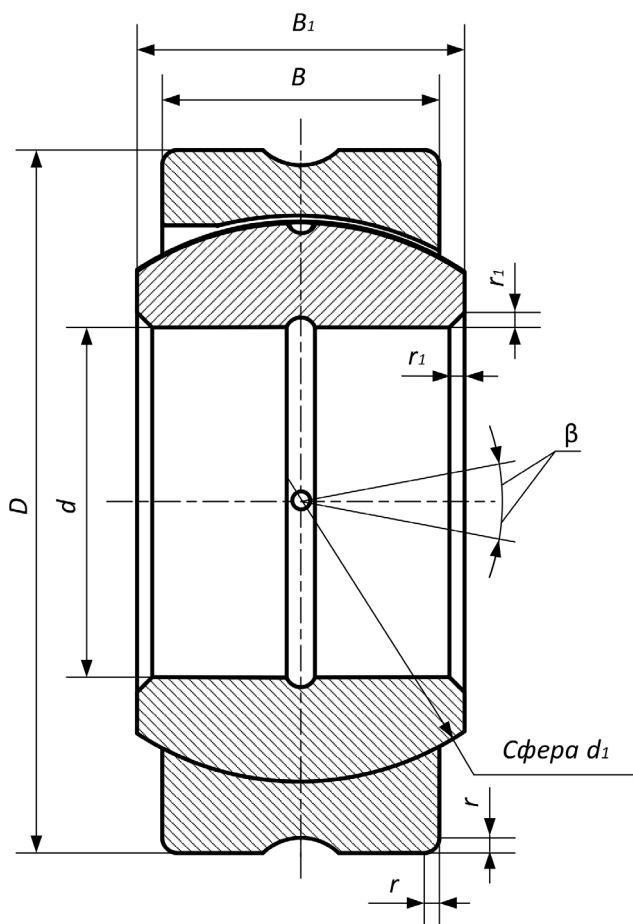


Рис. 1. Шарнирный подшипник:
 $D, d, B_1, B, r, r_1, r_2, d_1$ – соответствующие геометрические размеры; β – угол качания подшипника

Fig. 1. Spherical plain bearing:
 $D, d, B_1, B, r, r_1, r_2, d_1$ are the corresponding geometric dimensions; β is the swing angle of the bearing

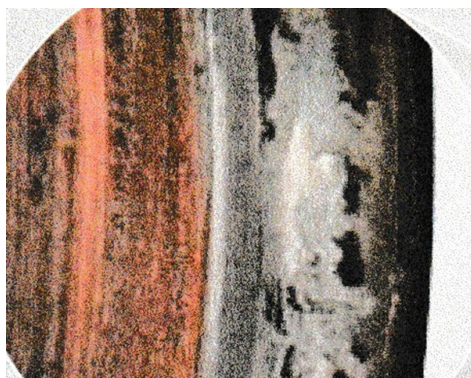


Рис. 2. Оплавленная поверхность подшипника
в зоне нагружения

Fig. 2. The melted surface of the bearing
in the loading zone

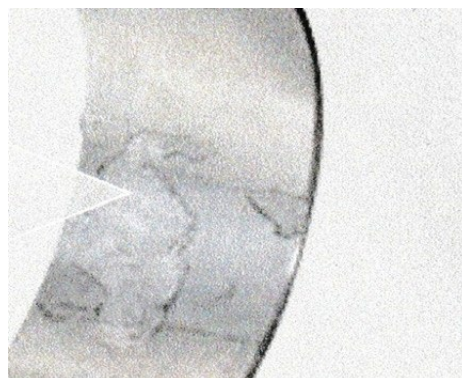


Рис. 3. Выработка металла кольца подшипника
в зоне нагружения

Fig. 3. Metal wear of the bearing ring
in the loading zone

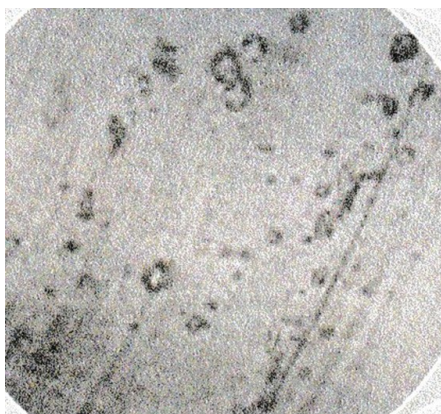


Рис. 4. Раковины глубиной до 0,2 мм

Fig. 4. Cavities up to 0.2 mm deep

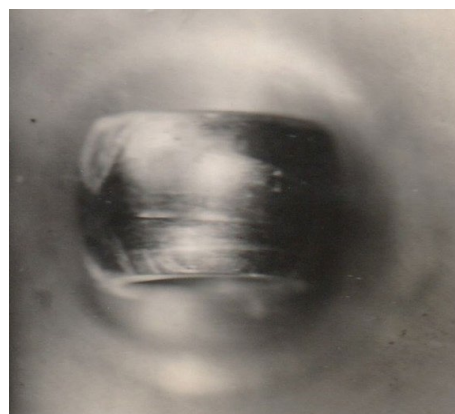


Рис. 5. Смятие металла глубиной до 0,3 мм

Fig. 5. Metal crumpling, up to 0.3mm deep

Подшипники типа Ш15 были установлены в узлах навески двигателя (расчетная нагрузка 40 кН). В ходе исследования было установлено следующее. Сферические поверхности колец подшипников в зоне нагружения имеют износ в виде полосовой выработки металла глубиной до 0,1 мм, смещенной от центра (рис. 6). До 40 % поверхности колец подшипников покрыты слоем коррозии глубиной до 0,2 мм (рис. 7).

Осевая игра подшипников равна 0,08–0,14 мм. По ГОСТ для новых подшипников она составляет 0,93–0,1 мм (табл. 1). Смазка в подшипниках отсутствовала. Осевая игра представляет собой смещение одного кольца

подшипника относительно другого. Величина осевой игры зависит от конструкции подшипников, способа установки и радиального зазора. Измерение радиального зазора и осевой игры необходимо для определения эксплуатационных качеств подшипника. Осевая игра существенно влияет на сроки службы подшипников и является одним из критериев работоспособности. В ГОСТ 3635-78¹ даны допустимые значения осевой игры для шарнирных подшипников.

¹ ГОСТ 3635-78 Подшипники шарнирные. Технические условия. М.: Стандартиформ, 1991. 25 с.

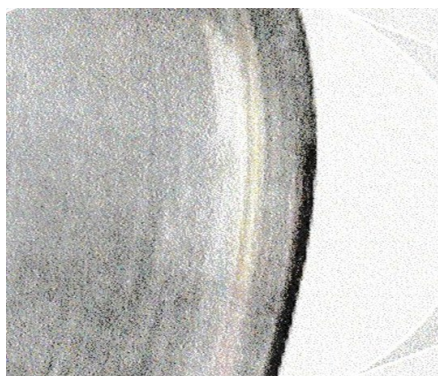


Рис. 6. Выработка металла глубиной до 0,1 мм, смещенная от центра

Fig. 6. Metal wear, up to 0.1 mm deep, offset from the center

Подшипники Ш20 были смонтированы в объекте (узлы навески двигателя), демонтированы после наработки 2 283 ч и исследованы (расчетная нагрузка 80 кН). При исследовании подшипника установлено, что сферические поверхности колец подшипников в зоне нагружения имеют износ [13] в виде полосовой выработки металла глубиной до 0,1 мм (рис. 8).

До 30 % поверхности всех деталей покрыты слоем коррозии вплоть до образования глубоких раковин глубиной до 0,1 мм. Осевая игра в подшипниках составляет от 0,1 до 0,12 мм. Смазка в подшипниках отсутствовала. Результаты испытаний представлены в табл. 1–3.

На втором этапе обработки результатов испытаний и исследований была установлена долговечность подшипников при указанной расчетной нагрузке, определенной разработчиком, и сравнение ее с допускаемой по ГОСТ 3635-78. Результаты сведены в табл. 4.

На третьем этапе были проведены визуальные осмотры подшипников, прошедших испытания на испытательных стендах и в процессе эксплуатации².

² IMS bearings dataset (2014) [Электронный ресурс] // NASA. URL: <https://paperswithcode.com/dataset/ims-bearing-dataset> (дата обращения: 21.10.2024).

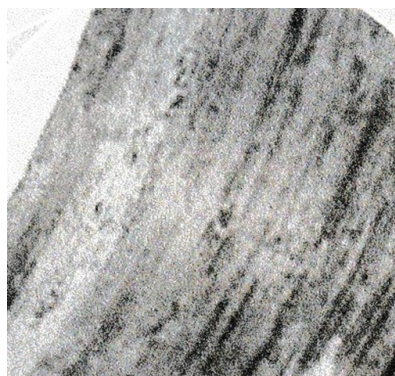


Рис. 7. Коррозия металла глубиной до 0,2 мм

Fig. 7. Metal corrosion, up to 0.2 mm deep

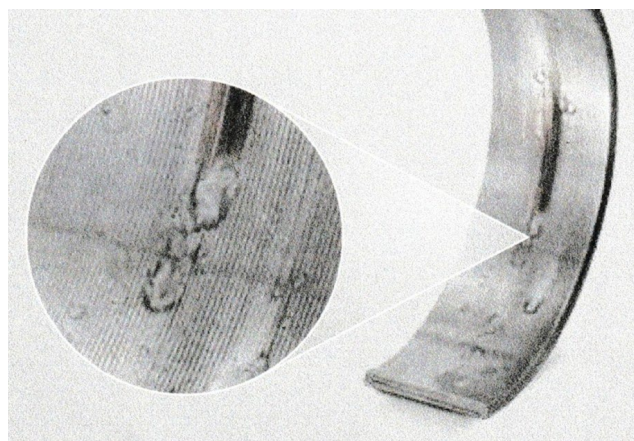


Рис. 8. Образование глубоких раковин глубиной до 0,1 мм

Fig. 8. Formation of deep cavities up to 0.1 mm deep

Неправильная работа подшипников в составе изделия выражалась в том, что паз на наружном кольце и лыска на внутреннем кольце находились в зоне нагружения [14]. Такая ситуация могла возникнуть по двум причинам: 1) проворачивание колец в составе изделия во время эксплуатации; 2) неправильный монтаж подшипника.

В ведомости согласования применения подшипников проставлены расчетные нагрузки, предположительно действующие на подшипник в постоянном режиме качания, а также максимальные, действующие на подшипник кратковременно. Допускаемые нагрузки по ГОСТ 3635-78 при числе повторных нагрузок не более 5 000.

Таблица 1
Table 1

Результаты испытаний подшипников Ш6
Ш6 bearing test results

Номер подшипников Ш6	Нагрузка, Н	Наработка, ч	Осевая игра, мм	
			По ГОСТ	Фактическая
1	1 000	2 291	0,03–0,1	0,1
2	1 000	2 260	0,03–0,1	0,14
3	2 000	2 087	0,03–0,1	0,13
4	2 000	2 115	0,03–0,1	0,6
5	3 000	2 163	0,03–0,1	0,75
6	3 000	2 084	0,03–0,1	1,2
7	3 000	2 090	0,03–0,1	0,96

Таблица 2
Table 2

Результаты испытаний подшипников Ш15
Ш15 bearing test results

Номер подшипников Ш15	Нагрузка, Н	Наработка, ч	Осевая игра, мм	
			По ГОСТ	Фактическая
1	40 000	2 283	0,93–0,1	0,14
2	40 000	2 283	0,93–0,1	0,08
3	40 000	2 283	0,93–0,1	0,08
4	40 000	2 283	0,93–0,1	0,09
5	40 000	2 283	0,93–0,1	0,12
6	40 000	2 283	0,93–0,1	0,10
7	40 000	2 283	0,93–0,1	0,09

Таблица 3
Table 3

Результаты испытаний подшипников Ш20
Ш20 bearing test results

Номер подшипников Ш20	Нагрузка, Н	Наработка, ч	Осевая игра, мм	
			По ГОСТ	Фактическая
1	80 000	2 283	0,03–0,1	0,1
2	80 000	2 283	0,03–0,1	0,14
3	80 000	2 283	0,03–0,1	0,13
4	80 000	2 012	0,03–0,1	0,6
5	80 000	1 560	0,03–0,1	0,17
6	80 000	3 001	0,03–0,1	0,1
7	80 000	3 001	0,03–0,1	0,12
8	80 000	3 001	0,03–0,1	0,11

Таблица 4
Table 4

Сравнение расчетной нагрузки с допустимой
Comparison of design load with permissible load

Обозначение подшипника	Расчетная нагрузка, Н	Допускаемая нагрузка по ГОСТ 3635-78, Н
Ш6	1 000–3 000	10 000
Ш15	40 000	51 750
Ш20	87 000	87 000
Ш25	148 000	140 000

Для подшипников, работающих в составе изделия, эксплуатационные нагрузки в 2–3 раза меньше [15]. Для предварительной оценки работоспособности подшипников и на основании проведенных исследований после испытаний была получена формула для теоретического расчета долговечности шарнирных подшипников.

В современной литературе отсутствуют методы расчета долговечности шарнирных подшипников и используются хорошо известные методы расчета долговечности для подшипников качения [3]. Рассмотрим расчет долговечности подшипника на примере ШН8ЮТ.

В концевике узла электропривода закрылков системы управления самолетом устанавливаются шарнирные подшипники марки ШН8ЮТ, изготовленные на ЗГПЗ в соответствии с едиными техническими условиями для самолетостроения. В соответствии с условиями эксплуатации данные подшипники имеют следующие характеристики и условия работы в составе изделия, сведенные в табл. 5.

Максимальная рабочая температура $t = +60$ °С. В методе, описанном в пособии ОАО «ВНИПП» «Рекомендации по выбору, расчету и согласованию подшипников», долговечность подшипников рассчитывается по формуле

$$L = a \left(\frac{C}{P} \right)^k \left(\frac{10^6}{60n} \right), \quad (1)$$

где a – коэффициент, характеризующий совместное влияние качества металла деталей и условий эксплуатации на долговечность подшипника;

C – динамическая грузоподъемность;

K – показатель степени ($K = 1$);

n – частота вращения (принята $n = 10$ об/мин);

P – эквивалентная динамическая нагрузка.

В методе расчета долговечности на базе зависимостей фирмы INA долговечность определяется по формуле

$$L = f_2 f_v \frac{sf}{v}, \quad (2)$$

где f_2 – температурный коэффициент;

f_v – коэффициент скорости скольжения.

Таблица 5
Table 5

Характеристики и условия эксплуатации подшипника ШН8ЮТ в составе изделия.
Characteristics and the operating conditions of the ШН8ЮТ bearing as part of the product

Обозначение подшипника	Размеры	Материал	Радиальная нагрузка, Fr	Угол качания, β	Динамическая грузоподъемность	Статическая грузоподъемность, C_0
ШН8ЮТ	8×17×5/8 d сферы 13	95X18Ш	2050 Н	±60°	6100 Н	15240 Н

Оценка работоспособности подшипника выполняется по эквивалентной нагрузке.

При данном методе расчета долговечность L подшипника в числе качаний определяется в зависимости от допускаемого значения пути трения S .

На основании многочисленных испытаний и проведенных исследований работоспособности на различных режимах в данной статье предлагается определять долговечность шарнирных подшипников [16], работающих при качательном движении, по расчетному удельному давлению, так как интенсивность изнашивания узлов определяется давлением на поверхности [17, 18].

Можно применить один из вариантов математического моделирования, который исполь-

зует методы регрессии для аппроксимации функции одной переменной [19]. Результаты можно сравнить по корреляции и наглядно на графике (рис. 9).

$$P = n^{14,03-0,21x}. \quad (3)$$

$$5\,000 \text{ кач.} = 25 \text{ кг/мм}^2$$

$$25\,000 \text{ кач.} = 20 \text{ кг/мм}^2$$

$$50\,000 \text{ кач.} = 15 \text{ кг/мм}^2$$

$$100\,000 \text{ кач.} = 10 \text{ кг/мм}^2$$

$$500\,000 \text{ кач.} = 4 \text{ кг/мм}^2$$

$$1\,000\,000 \text{ кач.} = 2 \text{ кг/мм}^2$$

$$P_{уд.} = \frac{R}{bd_{сф}}, \quad (4)$$

где R – нагрузка, действующая на подшипник, = 2050 Н, или ≈ 205 кг;

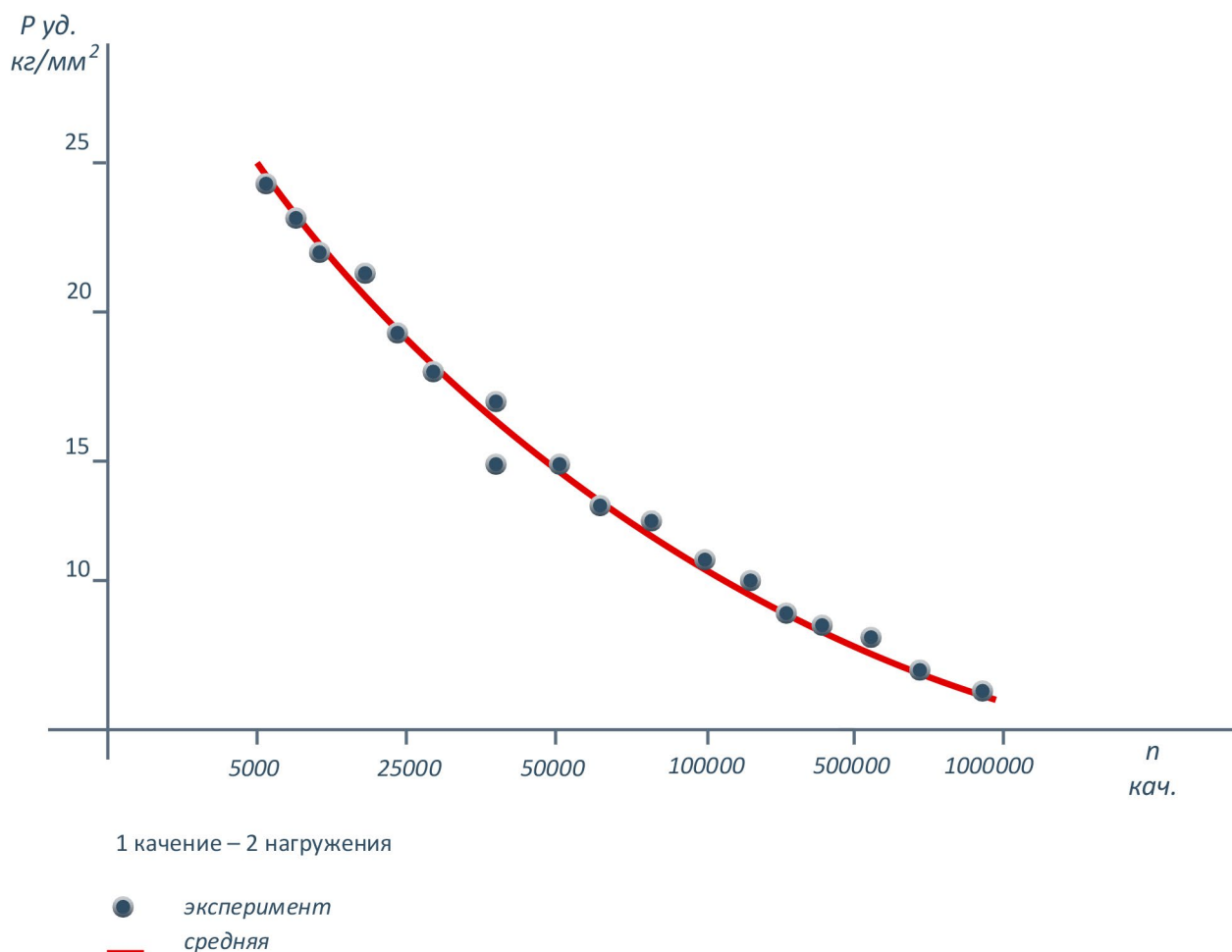


Рис. 9. Зависимость удельного давления от количества качаний

Fig. 9. Dependence of specific pressure on the number of swings

$b, d_{\text{сф}}$ – размеры подшипника.

$b = 5, d_{\text{сф}} = 13$ – размеры по ГОСТ 3635-78.

Полученный результат $3,15 \text{ кг/мм}^2$, в соответствии с графиком зависимости удельного давления и количества совершенных подшипником качаний и табл. 6, дает возможность гарантировать долговечность подшипника при заданных эксплуатационных режимах при работе более чем 500 000 качаний. Так, например, при ресурсе 60 000 летных часов подшипник совершает 100 000 качаний.

Методика оценки долговечности подшипников основана на сравнительном анализе результатов расчетов.

1-й способ – долговечность 4247912,77 ч –

расчет ведется $L = a \left(\frac{C}{P} \right)^k \left(\frac{10^6}{60n} \right)$;

2-й способ – долговечность 4113907,456 ч –

расчет ведется $L = f_2 f_v \frac{sf}{v}$;

3-й способ – долговечность 750 000 кач. –

расчет ведется $P_{\text{уд.}} = \frac{R}{bd_{\text{сф}}}$.

Расчеты дают возможность говорить о том, что подшипник соответствует режимам

работы и имеет большой запас по долговечности при правильном монтаже и эксплуатации.

Заключение

Методика оценки проведенных исследований и анализ состояния подшипников в механизмах управления показали, что подшипники имеют идентичное состояние, которое зависит от условий эксплуатации и правильной установки подшипников [20, 21].

1. Подшипники работали продолжительное время с недостаточным количеством смазки, о чем свидетельствует то, что на поверхности колец имеется наличие коррозии, вплоть до образования раковин.

2. На рабочих поверхностях имеются срезы металла, поперечные полосы и другие дефекты.

3. При визуальном осмотре обнаружена выработка металла, коррозия и другие дефекты. Смазка была загрязнена механическими примесями.

4. Проверка хода подшипников от руки показала, что подшипники имеют заедание.

Из изложенного можно сделать вывод, что в соответствии с методикой оценки долговеч-

Таблица 6
Table 6

Размеры некоторых шарнирных подшипников
Dimensions of some spherical plain bearings

Обозначение подшипника	b	$d_{\text{сф.}}$	Обозначение подшипника	b	$d_{\text{сф.}}$
Ш5	4	10	Ш40	22	53
Ш6	4	10	Ш45	25	60
Ш8	5	13	Ш50	28	66
Ш10	6	16	Ш55	32	74
Ш12	7	18	Ш60	36	80
Ш15	8	23	Ш70	40	92
Ш17	10	26	Ш80	45	105
Ш20	12	29	Ш90	50	115
Ш25	16	35	Ш100	55	136
Ш30	18	40	Ш110	55	140
Ш35	21	47	Ш120	70	160

ности подшипников работоспособность подшипников в механизмах управления зависит от условий эксплуатации и правильной установки подшипников, что и показывает состояние подшипников после испытаний.

Исследования показали, что подшипники работали без смазки, часть подшипников во время эксплуатации находилась в таком положении, когда паз наружного кольца и лыска внутреннего кольца находились в зоне нагружения.

Шарнирные подшипники играют важную роль в обеспечении надежности и безопасности авиационных систем. Долговечность напрямую зависит от эксплуатационных характеристик и влияет на сохранение летной годности авиационной техники. В данной работе рассмотрены основные факторы, влияющие на долговечность шарнирных подшипников, включая конструкцию, условия эксплуатации, используемые материалы, методы смазки. Даны рекомендации по расчету долговечности подшипников, работающих при качательном движении.

Список литературы

1. **Арепьев А.Н., Громов М.С., Шапкин В.С.** Вопросы эксплуатационной живучести авиаконструкций. М.: Воздушный транспорт, 2002. 424 с.
2. **Величко Е.И., Колесник И.А.** Материалы, применяемые для изготовления подшипников скольжения ГТУ // Наука. Новое поколение. Успех: сборник материалов III международной научно-практической конференции. Краснодар, 29 апреля 2022 г. Краснодар: Новация, 2022. С. 73–75.
3. **Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В., Перель Л.Я.** Подшипники качения: справочник. М.: Машиностроение, 1975. 572 с.
4. **Спришевский А.И.** Подшипники качения. М.: Машиностроение, 1968. 631 с.
5. **Басов В.Н.** Влияние длительной эксплуатации самолетов на прочностные характеристики материалов / В.Н. Басов, Г.И. Нестеренко, Б.Г. Нестеренко, В.Г. Петрусенко // Научный вестник МГТУ ГА. 2009. № 141. С. 38–48.
6. **Стрижиус В.Е.** Некоторые аспекты теории и практики обеспечения усталостной прочности и ресурса конструкции современных самолетов транспортной категории // Научный вестник МГТУ ГА. 2009. № 141. С. 66–75.
7. **Harris T.A., Kotzalas M.N.** Rolling bearing analysis. 5th ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 2006. 763 p. DOI: 10.1201/9781482275148
8. **Ebert F.J.** Fundamentals of design and technology of rolling element bearings // Chinese Journal of Aeronautics. 2010. Vol. 23, iss. 1. Pp. 123–136. DOI: 10.1016/S1000-9361(09)60196-5
9. **Yu A.** Reliability analysis of rolling bearings considering internal clearance / A. Yu, H.Z. Huang, H. Li, Ya.-F. Li, S. Bai // Journal of Mechanical Science and Technology. 2020. Iss. 34. Pp. 3963–3971. DOI: 10.1007/s12206-020-2206-9
10. **Harris T.A., Kotzalas M.N.** Advanced concepts of bearing technology: Rolling bearing analysis. 5th ed. CRC Press, 2006. 368 p. DOI: 10.1201/9781420006582
11. **Серенсен С.В., Когаев Б.П., Шнейдерович Р.М.** Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие / Под ред. С.В. Серенсена. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
12. **Ли Р.И.** Метод ускоренных усталостных испытаний полимерных материалов / Р.И. Ли, Д.Н. Писарев, М.Р. Киба, А.Ю. Мельников // Наука в центральной России. 2022. № 3 (57). С. 92–102. DOI: 10.35887/2305-2538-2022-3-92-102
13. **Бутушин С.В., Семин А.В.** Целостность элементов конструкции планера при длительной эксплуатации воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2009. № 141. С. 30–37.
14. **Mikic D.** Reliability analysis of rolling bearings considering the bearing radial clearance and operating temperature / D. Mikic, E. Desnica, I. Kiss, V. Mikic // Advanced Engineering Letters. 2022. Vol. 1, no. 1. Pp. 16–22. DOI: 10.46793/adeletters.2022.1.1.3
15. **Перфильева Е.В., Охрименко Н.В., Мозжерин К.В.** Повышение долговечности подшипников // Модели инновационных решений повышения конкурентоспособности

отечественной науки: сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции. Стерлитамак, 2021. С. 33–35.

16. **Kumar N., Satapathy R.K.** Bearings in aerospace, application, distress, and life: A review // *Failure Analysis and Prevention*. 2023. Vol. 23. Pp. 915–947. DOI: 10.1007/s 11668-023-01658-z

17. **Adams M.L.** Bearings. Basic concepts and design applications. 1st ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 2018. 309 p. DOI: 10.1201/b22177

18. **Harris T.A., Kotzalas M.N.** Essential concepts of bearings technology. 5th ed. CRC Press Taylor & Francis, 2006. 392 p. DOI: 10.1201/9781420006599

19. **Doll G.** Rolling bearings tribology. Elsevier Science, 2023. 290 p. DOI: 10.1016/C2019-0-03591-1

20. **Прохоров В.Ю.** Способ изготовления подшипника скольжения / В.Ю. Прохоров, Быков В.В., Найман В.С., Синюков Н.В., Тащилов С.В. Патент на изобретение № RU 27419721 C2: опубл. 01.02.2021. 8 с.

21. **Luo Y.** Dynamic load distribution of a radially loaded rolling bearing / Y. Luo, K. Ge, Y. Huang, W. Tu [Электронный ресурс] // *Shock and Vibration*. 2025. Vol. 2025. ID: 9098049. DOI: 10.1155/vib/9098049 (дата обращения: 21.10.2024).

References

1. **Arepev, A.N., Gromov, M.S., Shapkin, V.S.** (2002). Issues of aircraft structures operational stability. Moscow: Vozdushnyy transport, 2002. 424 p. (in Russian)

2. **Velichko, E.I., Kolesnik, I.A.** (2022). Materials used for the manufacture of GTU plain bearings. In: *sbornik materialov III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Nauka. Novoye pokoleniye*. Krasnodar: Novatsiya, pp. 73–75. (in Russian)

3. **Beyzelman, R.D., Tsyarkin, B.V., Perel, L.Ya.** (1975). Rolling bearings: handbook. Moscow: Mashinostroyeniye, 572 p. (in Russian)

4. **Sprishevsky, A.I.** (1968). Rolling bearings. Moscow: Mashinostroyeniye, 631 p. (in Russian)

5. **Basov, V.N., Nesterenko, G.I., Nesterenko, B.G., Petrusenko, V.G.** (2009). Material property degradation study during aircraft operation. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 141, pp. 38–48. (in Russian)

6. **Strijius, V.E.** (2009). Some aspects of the theory and practice of fatigue durability maintenance for transport category modern aircraft structure. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 141, pp. 66–75. (in Russian)

7. **Harris, T.A., Kotzalas, M.N.** (2006). Rolling bearing analysis. 5th ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 763 p. DOI: 10.1201/9781482275148

8. **Ebert, F.J.** (2010). Fundamentals of design and technology of rolling element bearings. *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 23, issue 1, pp. 123–136. DOI: 10.1016/S1000-9361(09)60196-5

9. **Yu, A., Huang, H.Z., Li, H., Li, Ya.-F., Bai, S.** (2020). Reliability analysis of rolling bearings considering internal clearance. *Journal of Mechanical Science and Technology*, issue 34, pp. 3963–3971. DOI: 10.1007/s12206-020-2206-9

10. **Harris, T.A., Kotzalas, M.N.** (2006). Advanced concepts of bearing technology: Rolling bearing analysis. 5th ed. CRC Press, 368 p. DOI: 10.1201/9781420006582

11. **Serensen, S.V., Kogaev, B.P., Shneyderovich, R.M.** (1975). Bearing capacity and strength calculation of machine parts: manual and reference guide, in Serensen S.V. (Ed.). Moscow: Mashinostroyeniye, 488 p. (in Russian)

12. **Li, R.I., Pisarev, D.N., Kiva, M., Melnikov, A.Yu.** (2022). Accelerated fatigue test method polymer materials. *Science in The Central Russia*, no. 3 (57), pp. 92–102. DOI: 10.35887/2305-2538-2022-3-92-102 (in Russian)

13. **Butushin, S.V., Semin, A.V.** (2009). Integrity of elements of a glider at continued airworthiness. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 141, pp. 30–37. (in Russian)

14. **Mikic, D., Desnica, E., Kiss, I., Mikic, V.** (2022). Reliability analysis of rolling bearings considering the bearing radial clearance and operating temperature. *Advanced Engineering Letters*, vol. 1, no. 1, pp. 16–22. DOI: 10.46793/adeletters.2022.1.1.3

15. Perfilieva, E.V., Okhrimenko, N.V., Mozzherin, K.V. (2021). Increasing the durability of bearings. In: *Modeli innovatsionnykh resheniy povysheniya konkurentnosposobnosti otechestvennoy nauki: sbornik statey po itogam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Sterlitamak, pp. 33–35. (in Russian)

16. Kumar, N., Satapathy, R.K. (2023). Bearings in aerospace, application, distress, and life: A review. *Failure Analysis and Prevention*, vol. 23, pp. 915–947. DOI: 10.1007/s 11668-023-01658-z

17. Adams, M.L. (2018). Bearings. Basic concepts and design applications. 1st ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 309 p. DOI: 10.1201/b22177

18. Harris, T.A., Kotzalas, M.N. (2006). Essential concepts of bearings technology. 5th ed. CRC Press Taylor & Francis, 392 p. DOI: 10.1201/9781420006599

19. Doll, G. (2023). Rolling bearings tribology. Elsevier Science, 290 p. DOI: 10.1016/C2019-0-03591-1

20. Prokhorov, V.Yu., Bykov, V.V., Naiman, V.S., Sinyukov, N.V., Tashilov, S.V. (2021). Method of sliding bearing manufacturing. Patent RU 27419721 C2: publ. February 01, 8 p. (in Russian)

21. Luo, Y., Ge, K., Huang, Y., Tu, W. (2025). Dynamic load distribution of a radially loaded rolling bearing. *Shock and Vibration*, vol. 2025, ID: 9098049. DOI: 10.1155/vib/9098049 (accessed: 21.10.2024).

Сведения об авторах

Харина Вера Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, h.vera@bk.ru.

Ратенко Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, ratenko.oleg@yandex.ru.

Варданын Георгий Бенурович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, g.vardanyan@mstuca.ru.

Information about the authors

Vera K. Harina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Chair of Technical Mechanics and Engineering Graphics, Moscow State Technical University of Civil Aviation, h.vera@bk.ru.

Oleg A. Ratenco, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Chair of Technical Mechanics and Engineering Graphics, Moscow State Technical University of Civil Aviation, ratenko.oleg@yandex.ru.

Georgiy B. Vardanyan, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Chair of Technical Mechanics and Engineering Graphics, Moscow State Technical University of Civil Aviation, g.vardanyan@mstuca.ru.

Поступила в редакцию

16.11.2022

Received

16.11.2022

Одобрена после рецензирования

17.02.2025

Approved after reviewing

17.02.2025

Принята в печать

25.03.2025

Accepted for publication

25.03.2025