

УДК 621.452.3.03:621.822.6

В.Н. ДОЦЕНКО, Ю.В. КОВЕЗА, С.В. НИКИТИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## ОЦЕНКА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ СО СТАЛЬНЫМИ И КЕРАМИЧЕСКИМИ ШАРИКАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ СМАЗЫВАНИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования параметров работоспособности подшипников с керамическими и стальными шариками. Для экспериментов использована установка, позволяющая исследовать подшипники при разных уровнях расхода смазки и нагрузок. Проанализировано изменение момента сопротивления вращению и приведенного коэффициента трения в подшипниках в зависимости от частоты вращения вала при смазывании маслом и воздушно-масляной смесью. Установлено, что гибридные подшипники ведут себя качественно и количественно примерно так же, как и стальные. Гидравлические потери в среднем в 2-3 раза превышают потери, связанные с трением тел качения об окружающие их детали.

**Ключевые слова:** подшипник качения, керамические шарики, экспериментальные исследования, момент сопротивления, приведенный коэффициент трения, воздушно-масляная смесь, гидравлические потери.

### Введение

Потребность промышленности в надёжных опорных узлах объясняет пристальный интерес исследователей к подшипникам с керамическими телами качения. Малая плотность и высокий модуль упругости при высокой жаропрочности керамики дают положительный эффект с точки зрения характеристик подшипников, работающих в турбинных опорных узлах в условиях интенсивного внешнего теплообмена, значительного внутреннего тепловыделения и высоких частотах вращения [1, 2].

Строгое математическое описание процессов в опорах газотурбинных агрегатов весьма затруднено сложностью взаимодействия элементов как внутри подшипника, так и с окружающими его деталями. Поэтому в настоящее время исследователей интересует не только сам факт возможности работы «керамических» подшипников (КП), но и возможность их эксплуатации в конкретных условиях наравне или вместо обычных «стальных», а также создание на основании этих опытов обобщенной методики расчёта гибридных подшипников.

В связи с этим проверяют работоспособность КП на натурных или моделирующих установках при тех же условиях, в которых работают стальные.

### Результаты исследований

При проведении сравнительных испытаний гибридных и обычных серийных авиационных подшипников нами были исследованы:

- потери на трение путём замера момента сопротивления;

- рациональные условия смазывания, обеспечивающие минимальные потери на трение и эффективное охлаждение исследуемых подшипников;

- уровень тепловыделения в подшипниках путём измерения температуры наружных колец подшипников.

Результаты испытаний позволят разработать рекомендации по применению гибридных подшипников и уточнять предлагаемые другими исследователями методики.

Все эти задачи решались посредством сравнительных испытаний подшипников на установке, описанной в [3], при следующих параметрах:

- тип подшипников: радиально-упорные шариковые с углом контакта  $26^\circ$ ;

- материалы обоймы – сталь ЭИ347-Ш; шариков: нитрид кремния и сталь ЭИ347-Ш;

- диаметр шариков 7,938 мм.

- диаметр отверстия под вал  $d_v = 38,5$  мм.

- осевая нагрузка  $P$ : 0, 1000 и 2000 Н;

- радиальная нагрузка отсутствовала;

- смазывание: струей масла с расходом 8,5 г/с, 15 г/с, 25 г/с; воздушно-масляной смесью с расходом воздуха 0,20 г/с и масла – 0,023 г/с, 0,046 г/с, 0,077 г/с;

- частота вращения вала  $n$ : 0...32000 мин<sup>-1</sup>.

В испытаниях измеряли: момент сопротивления на паре подшипников, температуру наружного кольца, температуру смазывающей среды на входе и выходе из блока подшипников, а также частоту вращения вала.

Подшипник со стальными шариками наработал в целом 300 минут, с керамическими шариками –

220 минут. После испытаний на деталях подшипников следов повреждения не обнаружено.

Некоторые результаты испытаний приведены на рис. 1 – 6. Первые четыре показывают зависи-

мость от частоты вращения вала момента сопротивления при различных способах смазки, осевых нагрузках и материалах тел качения, два последних – приведенного коэффициента трения.

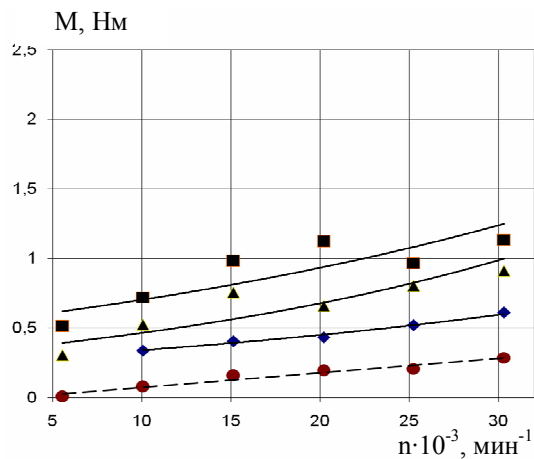


Рис. 1. Зависимость момента сопротивления  $M$  от частоты вращения вала  $n$  в подшипнике со стальными шариками без осевой нагрузки: расход масла  $\blacklozenge$  – 8,53 г/с;  $\blacktriangle$  – 15,6 г/с;  $\blacksquare$  – 24,4 г/с;  $\bullet$  – 0,032 г/с

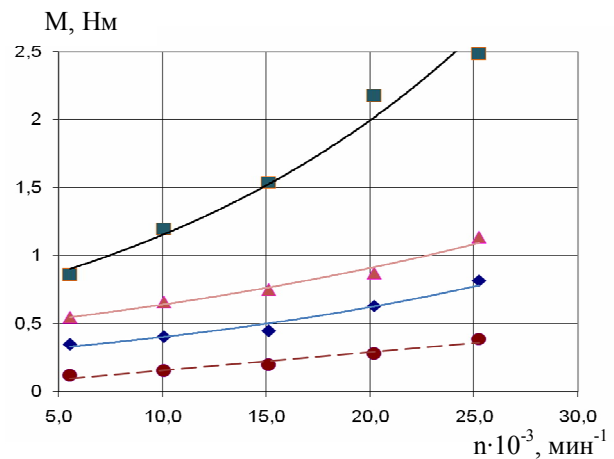


Рис. 2. Зависимость момента сопротивления  $M$  от частоты вращения вала  $n$  в подшипнике со стальными шариками при осевой нагрузке 2000 Н: расход масла  $\blacklozenge$  – 9,53 г/с;  $\blacktriangle$  – 11,6 г/с;  $\blacksquare$  – 20,7 г/с;  $\bullet$  – 0,08 г/с

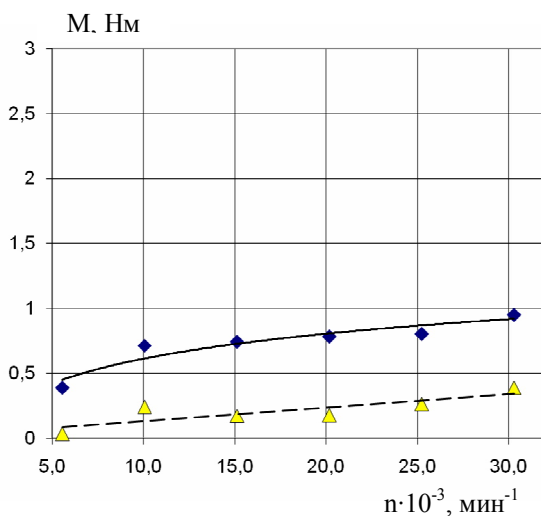


Рис. 3. Зависимость момента сопротивления  $M$  от частоты вращения вала  $n$  в подшипнике с керамическими шариками без осевой нагрузки:  $\blacklozenge$  – масло;  $\blacktriangle$  – воздушно-масляная смесь

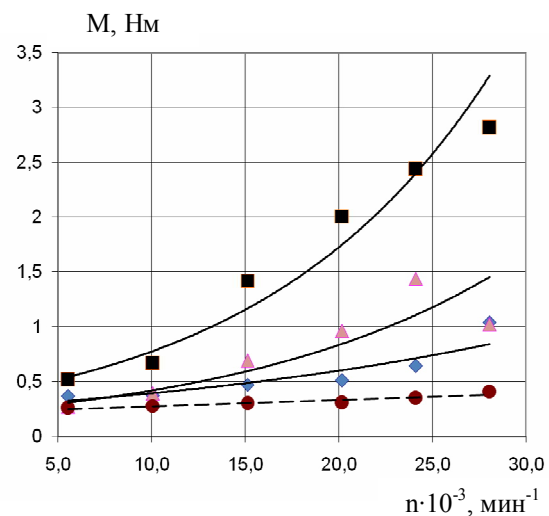


Рис. 4. Зависимость момента сопротивления  $M$  от частоты вращения вала  $n$  в подшипнике с керамическими шариками при осевой нагрузке 2000 Н: расход масла  $\blacklozenge$  – 10,1 г/с;  $\blacktriangle$  – 12,2 г/с;  $\blacksquare$  – 20,7 г/с;  $\bullet$  – 0,08 г/с

По рисункам 1 – 4 можно заметить ряд зависимостей, характерных и для стальных, и для керамических подшипников:

1. При смазке маслом (рис. 1 – 4, сплошные линии) момент сопротивления значительно (в 2-3 раза) больше, чем при смазке масляно-воздушной смесью (см. рис. 1-4, пунктирные линии), и разница эта тем больше, чем больше расход масла через подшипник.

Ранее было показано [4], что при смазке мас-

лом потери включают в себя две основные составляющие, обусловленные:

– контактом между деталями подшипника (сепаратором, шариками, обоймами), в том числе трением качения и трением в уплотнениях;

– гидравлическими потерями, связанными с перемешиванием жидкости шариками и сопротивлением её движению в каналах подшипника.

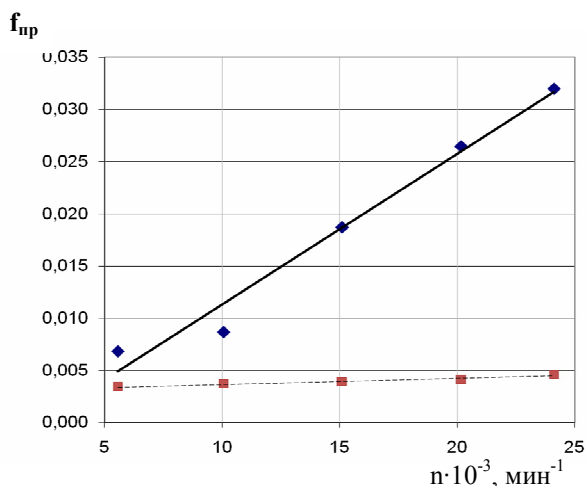


Рис. 5. Зависимость приведенного коэффициента трения  $f_{пр}$  от частоты вращения вала  $n$  в подшипнике с керамическими шариками:  
 ◆ – масло; ■ – воздушно-масляная смесь

Полученные результаты подтверждают вывод о значительно большем вкладе в потери в опорах гидравлической составляющей (до 80 % от всех потерь). У обоих подшипников она почти полностью совпадает качественно и количественно, поскольку не зависит от материала тела качения и обусловлена, по всей видимости, формой и площадью канала и вязкостью смазочного вещества, которые в проведенных исследованиях поддерживались одинаковыми.

2. При смазывании маслом и увеличении его прокачки сопротивление возрастает неравномерно: при увеличении подачи масла с 9 до 14 г/с (в 1,6 раза) момент увеличился от 0,68 до 2,4 Нм (в 3,5 раза), а при изменении от 14 до 19 г/с (в 1,4 раза) момент возрос с 2,4 до 2,6 Нм (на 8 %). Это можно объяснить резким возрастанием гидравлических потерь в подшипнике по мере заполнения его смазывающей жидкостью, после чего затраты на работу подшипника увеличиваются значительно меньше.

3. При смазывании масляным туманом и при отсутствии осевой силы (пунктирные линии на рис. 1, 3), и под нагрузкой (пунктирные линии на рис. 2, 4) момент сопротивления изменяется гораздо меньше во всём диапазоне исследованных частот вращения и мало зависит от расхода масла. В этом случае потери в подшипнике почти полностью вызваны трением между телами качения и обоймами, между телами качения и сепаратором.

Последний факт хорошо иллюстрируется рисунками 5 и 6, на которых показана зависимость приведенного коэффициента трения

$$f_{пр} = \frac{2M}{d_B P}$$

от частоты вращения при смазывании маслом (сплошные линии) и масляно-воздушной смесью (пунктирные линии).

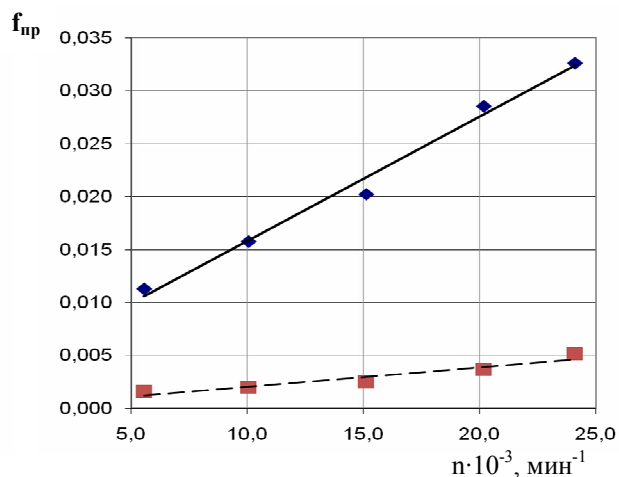


Рис. 6. Зависимость приведенного коэффициента трения  $f_{пр}$  от частоты вращения вала  $n$  в подшипнике со стальными шариками:  
 ◆ – масло; ■ – воздушно-масляная смесь

Так же как показано в [4], приведенный коэффициент трения практически линейно возрастает по мере возрастания скорости вращения. В проведенных исследованиях диапазоны значений коэффициентов трения для стали и керамики составили 0,003...0,005 и 0,002...0,005 соответственно, что согласуется с результатами проведенных ранее исследований и данными справочной литературы [5].

Можно отметить, что коэффициент трения у КП более стабильный и не превышает аналогичных значений у стального.

## Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Влияние частоты вращения, величины нагрузки, типа смазки и расхода смазывающего вещества на моменты трения в исследованных подшипниках качественно, а во многом и количественно одинаково для стальных и керамических подшипников.

2. Смазка маслвоздушной смесью существенно (в 3-5 раз) снижает потери трения в подшипнике.

3. Так же, как и у стальных, у КП гидравлические потери в масле гораздо больше (в 2-3 раза) потерь, вызванных непосредственным контактом тел качения с окружающими их деталями.

4. Значения приведенного коэффициента трения, рассчитанные по параметрам эксперимента, лежат в обычном диапазоне, что говорит об адекватности эксперимента.

5. Диапазон изменения параметров КП (момент трения, приведенный коэффициент трения) меньше, чем у стальных подшипников.

Таким образом, исследования показали, что в целом КП в достаточно широком диапазоне пара-

метров ведут себя аналогично традиционным стальным и могут быть альтернативой им в применении к турбинным агрегатам.

### Литература

1. Pinel S.I. *Com-parison Between Oil-Mist and Oil-Jet Lubrication of High-Speed, Small-Bore, Angular-Contact Ball Bear-ings* / S.I. Pinel, H.R. Signer, E.V. Zaretsky // NASA/TM 210462. – 2001.
2. Зарецкий А.С.. *Керамические подшипники для га-зотурбинных двигателей* / А.С. Зарецкий //

*Современное машиностроение. Сер. А. – 1989. – № 11. – С. 149.*

3. Доценко В.Н. *Вопросы исследования керамических и гибридных подшипников качения и их применение в авиационных двигателях* / В.Н. Доценко, С.В. Никитин // *Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – Вып. 55. – С. 138–144.*

4. Демидович В.М. *Исследование теплового режима подшипников ГТД* / В.М. Демидович. – М.: *Машиностроение, 1978. – 172 с.*

5. Перель Л.Я. *Подшипники качения: Расчёт, проектирование и обслуживание опор: Справочник* / Л.Я. Перель. – М.: *Машиностроение, 1983. – 543 с.*

Поступила в редакцию 1.06.2010

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, доцент В. А. Меньшиков, Харьковский национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ОЦІНКА ВИТРАТ МІЦНОСТІ В ПІДШИПНИКАХ КОЧЕННЯ ІЗ СТАЛЕВИМИ ТА КЕРАМІЧНИМИ КУЛЬКАМИ ПРИ РІЗНИХ УМОВАХ ЗМАЩУВАННЯ

*В.М. Доценко, Ю.В. Ковеза, С.В. Нікітін*

Надані результати експериментального дослідження параметрів праце спроможності підшипників з керамічними й сталевими кульками. Для експериментів використана установка, що дозволяє дослідити підшипники при різноманітних рівнях витрат мастила й навантажень. Проаналізована зміна моменту опору обертанню й наведеного коефіцієнта тертя в підшипниках в залежності від частоти обертання валу при змазуванні їх мастилом і повітряно-масляною сумішшю. Установлено, що гібридні підшипники з керамічними кульками поводяться якісно й кількісно, приблизно так само, як і зі сталевими. Гідравлічні витрати у середньому в 2-3 рази перевищують втрати, пов'язані з тертям тіл кочення про навколишні деталі.

**Ключові слова:** підшипник кочення, керамічні кульки, експериментальні дослідження, момент опору, наведений коефіцієнт тертя, повітряно-масляна суміш, гідравлічні втрати.

### AN ESTIMATION OF POWER LOSSES IN ROLLING BEARING WITH STEEL AND CERAMIC BALLS AT DIFFERENT GREASING CONDITIONS

*V.N. Docenko, Y.V. Koveza, S.V. Nikitin*

The results of experimental research of bearing capacity parameters with the ceramic and steel balls are presented. For experiments, the special set was created, it allows to investigate bearing at the different levels of expense of lubricant and loading. The change of resistance moment to the rotation and the reduced coefficient over of friction are analyzed in bearing at greasing by oil and air-oil mixture as a function of these parameters from frequency of rotation of billow. It is set that bearing with ceramic balls in all investigational range behave high-quality and in number, approximately similarly, as well as with steel. Hydraulic losses in investigational knots on the average in 2-3 times exceed losses, related to the friction of rolling bodies at the surrounding details of bearing.

**Key words:** rolling bearing, ceramic balls, experimental researches, moment of resistance, the reduced coefficient over of friction, air-oil mixture, hydraulic losses.

**Доценко Владимир Николаевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры теоретической механики и машиноведения НАКУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: dov1202@ukr.net.

**Ковеза Юрий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры теоретической механики и машиноведения НАКУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: koveza@ukr.net.

**Никитин Сергей Владимирович** – ассистент кафедры теоретической механики и машиноведения НАКУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: nikitinsrg@rambler.ru.