

**Кузьменко А.Г.,
Криворотько В.М.,
Савчук А.Е.**

Хмельницкий национальный университет,
г. Хмельницкий, Украина

**ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕ В
ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ.
ЧАСТЬ II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕ-
ДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ**

В первой части статьи дали теоретические и методические основы методики экспериментального определения величины проскальзывания в осевых и радиальных подшипниках качения.

В данной второй части методики реализована при использовании специально разработанных установок.

4. Закономерности проскальзывания в упорных подшипниках качения (УПК)

4.1. Испытания подшипника 8204

4.1.1. Установка и методика испытаний

1⁰. Установка для испытаний упорных подшипников качения на износ и проскальзывание состоит из сверлильного станка типа Jet и рабочей головки (рис. 4.1, рис. 4.2).

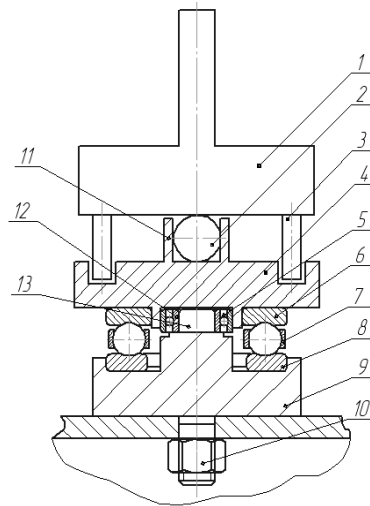


Рис. 4.1 – Схема рабочей головки для испытаний УПК на износ и проскальзывание:

1 – водило; 2 – опорный шарик; 3 – штыри вилки; 4 – верхний опорный передаточный диск;
5 – центрирующий радиальный подшипник качения; 6 – верхнее кольцо испытываемого УПК; 7 – сепаратор УПК;
8 – нижнее кольцо УПК; 9 – нижний опорный диск; 10 – винт крепления нижнего опорного диска



а – общий вид



б – рабочая головка

Рис. 4.2 – Фото рабочей головки

Сверлильный станок в качестве привода и нагружающего устройства часто используется в установках для испытаний на износ, в частности, упорных подшипников качения. Основным недостатком таких установок является недопустимо большое радиальное биение патрона, закрепленного в шпинделе станка.

Биение патрона приводит к тому, что дорожка качения шарика дополнительно разбивается на ширину биения. При этом, если величина радиального биения соизмерима с шириной дорожки качения образующейся при износе, то точность измерений износа недопустимо мала.

2⁰. В результате разработки и испытаний различных вариантов нами предложена работоспособная конструкция, схема которой приведена на (рис. 4.1).

Рабочая головка состоит из водила 1, закрепляемого в патроне сверлильного станка. В водиле на резьбе закреплены два штыря 3, которые играют роль вилки, передающей вращательное движение от водила к верхнему опорному диску 4, в котором выполнены два отверстия диаметром существенно большим, чем диаметры штырей.

Осевая нагрузка от реечного механизма сверлильного станка через шпиндель и водило передается на шарик 2. Шарик располагается с зазором в удерживающих направляющих 11.

В нижней части верхнего опорного диска закреплено внешнее кольцо 5, центрирующего радиального подшипника качения. Внутреннее кольцо 12 этого подшипника закреплено на неподвижной оси 13, соединенной с нижним опорным диском 9. Этот диск через винт 10 жестко соединен с нижним основанием станка.

Наружное кольцо центрирующего подшипника соединено с верхней вращающейся опорой головки 4. В этой же верхней опоре закреплено верхнее кольцо испытываемого упорного подшипника.

Вращательное движение от верхнего кольца УПК через шарики передается на нижнее неподвижное кольцо 8, УПК. Нижнее кольцо закреплено в нижнем опорном диске.

При испытаниях на износ испытываемый образец устанавливается на место нижнего кольца УПК.

3⁰. При испытаниях на проскальзывание на время испытаний устанавливается УПК 8204. При вращении верхнего кольца со скоростью n_1 одновременно вращается сепаратор 7 со скоростью n_c .

Число оборотов кольца и сепаратора измеряем с помощью электронного цифрового тахометра типа DT2234В. На верхнее кольцо и на сепаратор наклеиваются кусочки фольги размером 5×10 мм. Луч от тахометра периодически попадает на фольгу и фиксирует число оборотов в минуту с точностью до первого знака после запятой. Результаты измерений собраны в таблицах и графиках.

Испытания на проскальзывания проводились при нагрузках (кг) 5; 10; 20; 30; 40; 50 кг на подшипник УПК 8204. Обороты верхнего кольца изменялись ступенчато: 262; 495; 882; 1349; 1585; 2450 об/мин.

4⁰. Обработка результатов испытаний выполнялась по методике разработанной и изложенной в п. 3 данной работы.

В соответствии с этой методикой теоретическое число оборотов сепаратора УПК n_c^T равно половине числа оборотов вращающегося кольца n_1 :

$$n_c^T = \frac{n_1}{2}, \quad (4.1.1)$$

а величина коэффициента проскальзывания выражается через экспериментальное число оборотов сепаратора $n_c^э$ по зависимости:

$$\varepsilon = \frac{n_c^э - n_c^T}{n_c^э} = 1 - \frac{n_c^T}{n_c^э}. \quad (4.1.2)$$

Пример: для данных представленных в табл. 4.1 при $n_1 = 261$ об/мин; $Q_{кр} = 5$ кг; $n_c^э = 260,9$ об/мин; $n_c^T = 135,4$ об/мин.

Подставляя (4.1.1) в (4.1.2), имеем:

$$\varepsilon = 1 - \frac{n_k}{2n_c} \quad (4.1.3)$$

5⁰. Пример обработки результатов эксперимента. По данным табл. 4.1. при $Q_{ж25} / 261$ об/мин; $Q_{ж25}$ 5 кг число оборотов сепаратора получено $n_{сеп} / 135,4$ об/мин.

По формуле (4.1.3), имеем:

$$\varepsilon = 1 - \frac{n_k}{2n_c} = 1 - \frac{260,9}{2 \cdot 135,4} = 0,0366.$$

Из опытов следует, что реальное число оборотов больше теоретического числа оборотов. Результаты обработки данных для всех экспериментов представлены в таблицах. Статистические характеристики определялись по следующим зависимостям:

1) среднее значение коэффициента проскальзывания:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i; \quad (4.1.4)$$

2) среднеквадратическое отклонение σ_ε коэффициента ε :

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}; \quad (4.1.5)$$

3) коэффициент вариации:

$$v_\varepsilon = \frac{\sigma_\varepsilon}{\bar{\varepsilon}}. \quad (4.1.6)$$

4.1.2. Результаты испытаний

В табл. 4.1 и 4.2 представлены фактические результаты измерения числа оборотов сепаратора при разных нагрузках и при разных числах оборотов внутреннего кольца подшипника 8204. Испытания со смазкой и без смазки проведены по две серии опытов всего по 36 вариантам испытаний (по 2 испытания на вариант).

Таблица 4.1

Фактические данные испытаний без смазки							
Опыт №1							
Число оборотов, об/мин	$Q, \text{ кг}$						n_k , номинальные, об/мин
	5	10	20	30	40	50	
I	2	3	4	5	6	7	8
n_k	260,9	261,2	261,2	260,9	260,8	260,3	261
n_c	135,4	134,6	135,0	134,8	134,5	134,5	
n_k	496,2	496,4	496,0	495,6	495,3	495,5	496
n_c	255,2	256,1	256,8	255,8	255,7	255,9	
n_k	882,1	882,4	881,3	880,8	879,8	879,4	881
n_c	455,2	455,8	457,3	457,1	456,5	456,1	
n_k	1349	1350	1348	1349	1347	1346	1348
n_c	694,2	698,1	698,1	698,9	697,5	698,2	
n_k	1587	1588	1586	1584	1583	1582	1585
n_c	821,4	821,1	821,3	820,7	819,4	819,2	
n_k	2396	2418	2411	2413	2401	2398	2405
n_c	1243	1247	1244	1248	1242	1240	
Опыт №2							
n_k	261,3	261,3	261,6	261,8	261,2	261,0	261
n_c	134,6	135,5	136,2	136,6	136,1	136,3	

n_k	496,0	496,2	496,1	496,4	495,9	495,5	496
n_c	258,4	257,6	258,4	257,8	258,6	258,8	
n_k	883,1	883,5	882,7	882,8	882,1	882,4	882
n_c	455,2	455,8	457,3	457,1	456,5	456,1	

Продолжение таблицы 4.1

l	2	3	4	5	6	7	8
n_k	1349	1351	1350	1350	1349	1349	1349
n_c	701,0	702,3	702,0	701,5	702,0	703,3	
n_k	1589	1589	1591	1587	1586	1585	1587
n_c	825,6	826,4	828,0	825,7	826,7	827,5	
n_k	2444	2447	2450	2442	2430	2428	2440
n_c	1273	1247	1275	1271	1267	1266	

Таблица 4.2

Фактические данные испытаний смазка литол-24

Опыт №1							
Число оборотов, об/мин	Q , кг						n_k , номинальные, об/мин
	5	10	20	30	40	50	
n_k	262,6	262,4	262,3	262,1	261,9	261,9	262
n_c	135,6	234,5	134,4	135,4	134,9	135,3	
n_k	497,1	496,8	496,5	496,7	495,8	495,2	496
n_c	256,2	256,0	255,1	257,6	256,9	255,5	
n_k	884,2	884,1	883,2	881,7	881,7	880,2	883
n_c	455,9	456,9	457,2	455,0	454,6	457,1	
n_k	1349	1350	1348	1348	1346	1345	1349
n_c	703,3	696,7	694,7	693,5	693,5	693,5	
n_k	1587	1588	1588	1585	1581	1580	1585
n_c	820,2	818,2	821,1	820,6	820,5	820,4	
n_k	2436	2458	2443	2413	2394	2411	2420
n_c	1275	1268	1259	1255	1246	1247	
Опыт №2							
n_k	261,4	261,8	261,5	261,5	261,4	261,2	262
n_c	134,2	135,5	135,2	135,1	134,4	134,4	
n_k	496,0	495,7	495,7	495,5	495,0	494,9	495
n_c	257,3	256,9	256,9	256,3	255,8	255,2	
n_k	883,6	883,3	882,6	882,5	881,0	880,9	882
n_c	454,9	454,3	455,6	454,2	455,3	451,6	
n_k	1349	1350	1349	1349	1347	1346	1349
n_c	697,8	699,1	696,5	697,5	697,2	696,4	
n_k	1586	1587	1586	1584	1583	1580	1585
n_c	821,7	821,4	817,8	817,4	810,4	810,1	
n_k	2455	2454	2452	2436	2425	2407	2440
n_c	1273	1269	1264	1251	1248	1240	

Фактические результаты испытаний обработаны по методике изложенной в п. 4.1. Сводные таблицы коэффициентов проскальзывания (КП) приведена в табл. 4.3 без смазки и табл. 4.4 со смазкой.

Таблица 4.3

Сводная таблица коэффициентов проскальзывания в подшипнике 8204 без смазки

Опыт №1							
---------	--	--	--	--	--	--	--

Число оборотов верхнего кольца n_k , об/мин	Q , кг						ε_{cp}
	5	10	20	30	40	50	
l	2	3	4	5	6	7	8
261	0,0366	0,0297	0,0326	0,0323	0,0305	0,0323	0,0323
496	0,0278	0,0308	0,0343	0,0313	0,0315	0,0318	0,0313

Продолжение таблицы 4.3

l	2	3	4	5	6	7	8
882	0,0311	0,0320	0,0364	0,0376	0,0364	0,0359	0,0349
1349	0,0284	0,0331	0,0345	0,0349	0,0344	0,0361	0,0336
1585	0,0339	0,0330	0,0345	0,0349	0,0340	0,0344	0,0341
2400	0,0362	0,0305	0,0309	0,0332	0,0334	0,0331	0,0329
Общее среднее	$\bar{\varepsilon} = 1,181 \cdot 10^{-3}$; $1,181 \cdot 10^{-3}$; $v_\varepsilon = 0,0356$; $\bar{\varepsilon} = 0,0332$						
Опыт №2							
261	0,0422	0,0358	0,0470	0,0417	0,0404	0,0426	0,0406
496	0,0402	0,0369	0,0401	0,0372	0,0412	0,0427	0,0397
882	0,0353	0,0399	0,0378	0,0409	0,0385	0,0383	0,0385
1349	0,0378	0,0382	0,0385	0,0378	0,0392	0,0409	0,0387
1585	0,0377	0,0386	0,0393	0,0389	0,0408	0,0423	0,0396
2400	0,040	0,0396	0,0392	0,0393	0,0410	0,0411	0,0400
Общее среднее	$\bar{\varepsilon} = 1,181 \cdot 10^{-3}$; $7,2457 \cdot 10^{-4}$; $v_\varepsilon = 0,0183$; $\bar{\varepsilon} = 0,0395$						

Таблица 4.4

Сводная таблица коэффициентов проскальзывания в подшипнике 8204 при смазке литол-24

Опыт №1							
Число оборотов верхнего кольца n_k , об/мин	Q , кг						ε_{cp}
	5	10	20	30	40	50	
262	0,0317	0,0245	0,0242	0,0321	0,0293	0,0322	0,029
496	0,0298	0,0297	0,0269	0,0359	0,0350	0,0309	0,0314
882	0,0303	0,0325	0,0341	0,0311	0,0303	0,0372	0,0326
1349	0,0409	0,0311	0,0298	0,0281	0,0296	0,0303	0,0316
1585	0,0326	0,0296	0,0330	0,0342	0,0366	0,0371	0,0339
2400	0,0447	0,0308	0,0298	0,0386	0,0393	0,0332	0,0361
Общее среднее	$\bar{\varepsilon} = 1,181 \cdot 10^{-3}$; $1,7156 \cdot 10^{-3}$; $v_\varepsilon = 0,0529$; $\bar{\varepsilon} = 0,0324$						
Опыт №2							
261	0,0261	0,0339	0,0329	0,0322	0,0275	0,0283	0,0302
496	0,0361	0,0352	0,0337	0,0334	0,0324	0,0303	0,0335
882	0,0288	0,0278	0,0314	0,0285	0,0325	0,0247	0,0289
1349	0,0333	0,0345	0,0316	0,0329	0,0340	0,0336	0,0333
1585	0,0349	0,0339	0,0303	0,0311	0,0233	0,0248	0,0297
2400	0,0357	0,0331	0,0301	0,0264	0,0284	0,0294	0,0305
Общее среднее	$\bar{\varepsilon} = 1,181 \cdot 10^{-3}$; $1,7569 \cdot 10^{-3}$; $v_\varepsilon = 0,0566$; $\bar{\varepsilon} = 0,0310$						

Итоговые значения КП приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Итоговая таблица результатов

Условия опыта	$\bar{\varepsilon}$	$\bar{\varepsilon} \cdot 10^{-3}$	v_ε
Без смазки №1	0,0332	1,181	0,0356
Без смазки №2	0,0395	0,7246	0,0183

Среднее без смазки	0,0364	0,9528	0,02695
Литол-24 №1	0,0324	1,7156	0,0529
Литол-24 №2	0,0310	1,7569	0,0566
Среднее литол-24	0,0317	1,7363	0,05475

Для наглядности зависимости КП представлены в виде графиков $\varepsilon(n, Q)$ на рисунках рис. 4.3 и рис. 4.5 без смазки, рис. 4.4 и рис. 4.6 со смазкой.

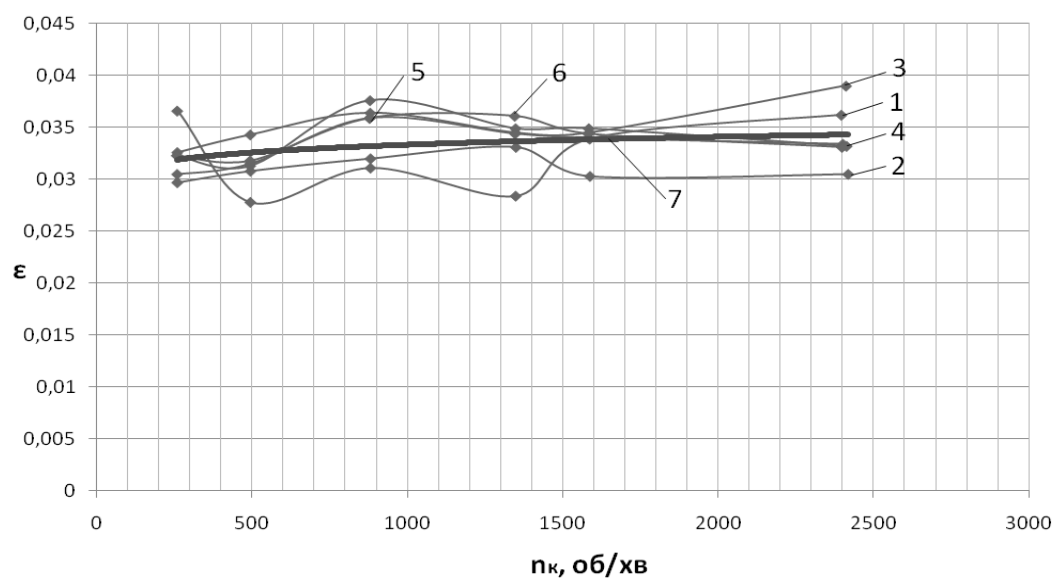


Рис. 4.3 – График зависимости $\varepsilon(n_k)$ без смазки, опыт № 1:

- 1 – нагрузка 5 кг; 2 – нагрузка 10 кг;
- 3 – нагрузка 20 кг; 4 – нагрузка 30 кг;
- 5 – нагрузка 40 кг; 6 – нагрузка 50 кг;
- 7 – среднее значение

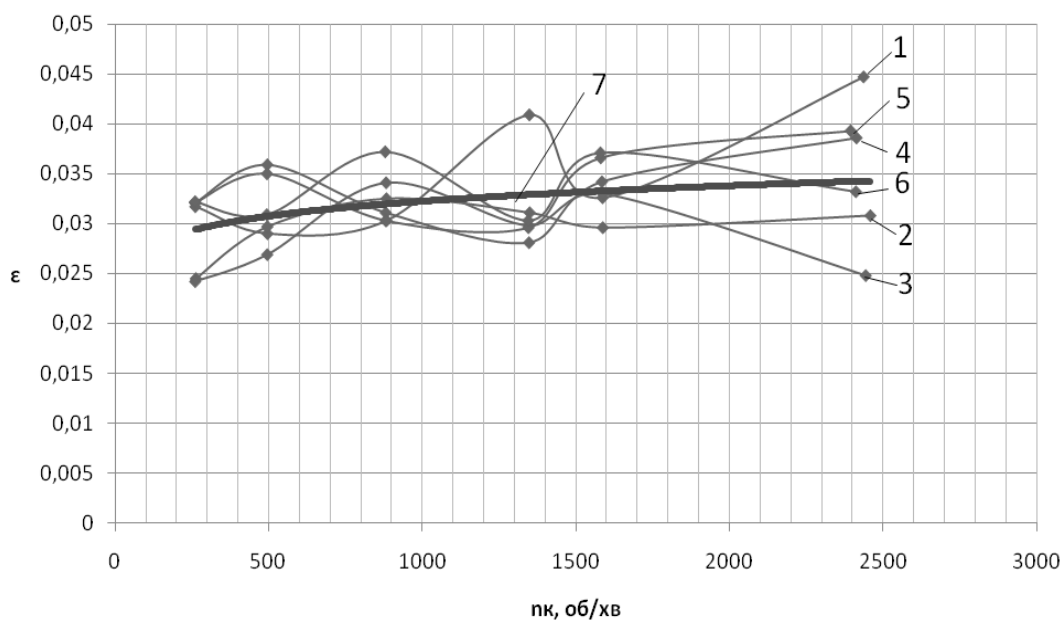
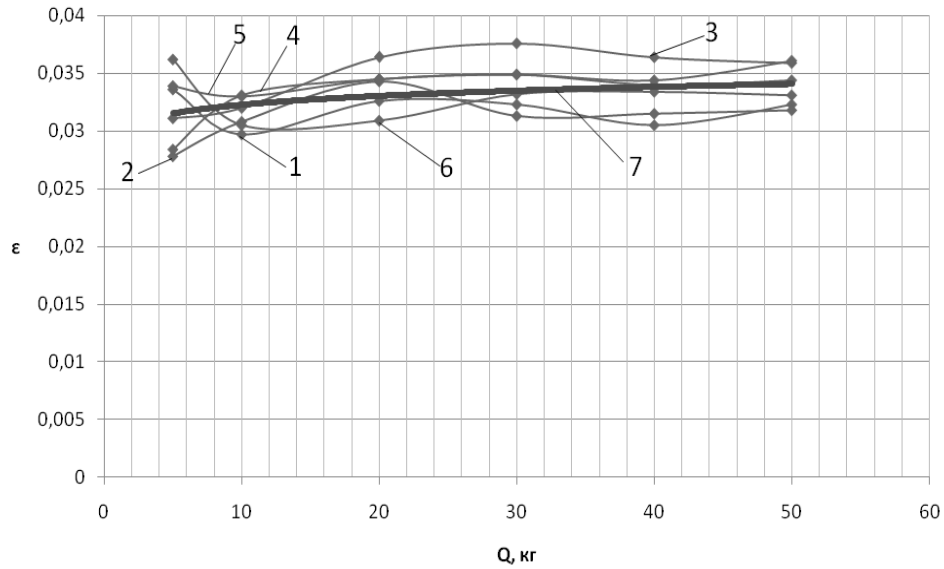
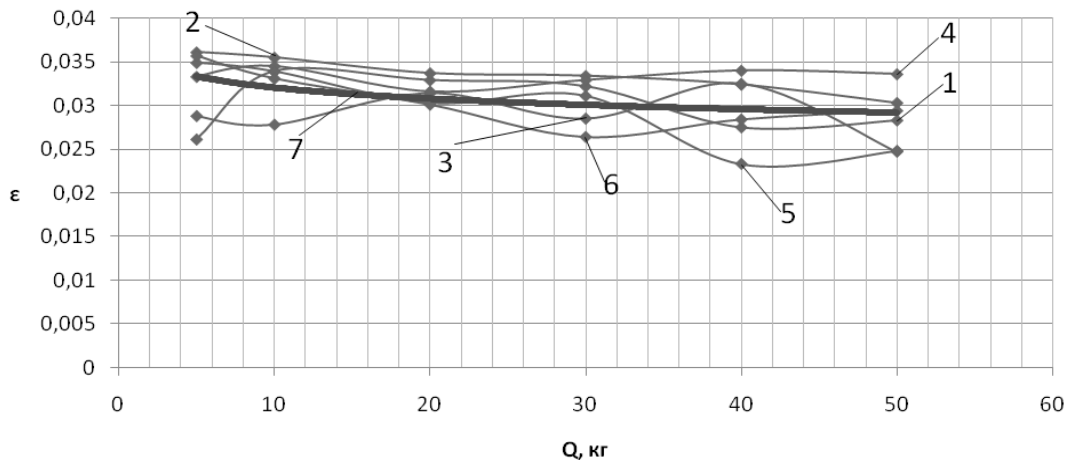


Рис. 4.4 – График зависимости $\varepsilon(n_k)$ смазка литол-24, опыт № 1:

1 – нагрузка 5 кг; 2 – нагрузка 10 кг;
 3 – нагрузка 20 кг; 4 – нагрузка 30 кг;
 5 – нагрузка 40 кг; 6 – нагрузка 50 кг;
 7 – среднее значение

Рис. 4.5 – График зависимости $\varepsilon(Q)$ без смазки, опыт № 2:

1 – $n_k \approx 261$ об/мин; 2 – $n_k \approx 495$ об/мин;
 3 – $n_k \approx 882$ об/мин; 4 – $n_k \approx 1347$ об/мин;
 5 – $n_k \approx 1585$ об/мин; 6 – $n_k \approx 2410$ об/мин;
 7 – среднее значение

Рис. 4.6 – График зависимости $\varepsilon(Q)$ смазка литол-24, опыт № 2:

1 – $n_k \approx 261$ об/мин; 2 – $n_k \approx 495$ об/мин;
 3 – $n_k \approx 882$ об/мин; 4 – $n_k \approx 1347$ об/мин;
 5 – $n_k \approx 1585$ об/мин; 6 – $n_k \approx 2410$ об/мин;
 7 – среднее значение

4.2. Испытания осевого подшипника 8211

1⁰. Проведение динамических испытаний на проскальзывание на сравнительно большом (внутренний диаметр 55 мм) подшипнике затрудняется из-за необходимости задания большой (до 3000 кг) нагрузки. В связи с этим для этого подшипника были проведены квазистатические испытания.

Принцип и схема испытаний также как и описанные в п.4.1. для малого подшипника 8204.

В качестве нагружающего устройства был использован пресс Бринелля для определения твердости.

Схема испытаний показана на рис. 4.7.

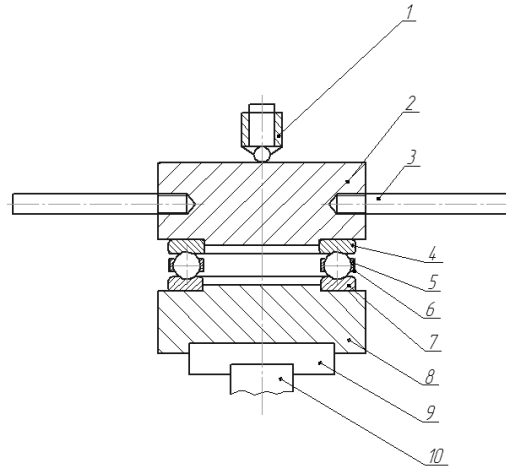


Рис. 4.7 – Схема устройства для определения коэффициента проскальзывания в УПК 8211:

- 1 – передача нагрузки от пресса Бринелля через шарик;
 2 – нагружающая плита; 3 – ручки для поворота нагружающей плиты;
 4 – верхнее кольцо подшипника; 5 – сепаратор подшипника;
 6 – шкала наклеенная на сепаратор; 7 – нижнее кольцо подшипника;
 8 – нижняя опорная плита; 9, 10 – элементы опорной части винта пресса Бринелля.

2⁰. Приспособление для определения коэффициента податливости работает следующим образом.

1. Приспособление устанавливается на опорную часть винта пресса; винтом верхняя плита 2 подводится в соприкосновение с нагружающим шариком 1; на прессе задается необходимая нагрузка.

2. Шкала 5 на сепараторе 6 устанавливается в нулевое положение; с помощью ручек 3 выполняется поворот наружного кольца 4 подшипника на два оборота, или на величину кратную двум оборотам.

3. По шкале определяется угол Φ , на который поворачивается сепаратор при двух оборотах кольца.

4. Коэффициент проскальзывания определяется как отношение замеренного угла к теоретически ожидаемому Φ_T :

$$\varepsilon = \frac{\Delta \Phi}{\Phi_T} ; \quad (4.2.1)$$

При двух оборотах верхнего кольца $\Phi_T = 2\pi$, тогда:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \Phi}{2\pi} ; \quad (4.2.2)$$

При n оборотов верхнего кольца и внешнем диаметре сепаратора D_c :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{\pi D_c} ; \quad (4.2.3)$$

$$\Delta l_1 = \frac{2\Delta \ln}{n} ; .$$

В подшипнике № 8211 $D_{вн} = 90$ мм;

5. Величина изменения пути трения сепаратора усредняется; данные об измерениях приведены в табл. 4.6; среднее значение величины пути (обгона – отставания) наружного диаметра сепаратора составило 2,2 мм.

6. Определяем величину коэффициента проскальзывания:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{\pi \varnothing_{90}} = \frac{2,2}{\pi \varnothing_{90}} = 0,00778 ; 0,0078 = 7,8\%.$$

3°. Одновременно с измерением величины проскальзывания измеряется момент трения и коэффициент трения.

Для измерения момента измеряются силы F_{Tp} на ручках верхней плиты 2. Коэффициент трения f определяется как отношение:

$$f = \frac{F_{Tp}}{Q}. \quad (4.2.4)$$

Результаты определения коэффициента трения приведены в табл. 4.6.

Из таблицы следует, что с увеличением нагрузки от 250 кг до 3000 кг коэффициент трения снижается от 0,0026 до 0,0017.

Таблица 4.6

Смещение сепаратора от теоретического положения Δl , мм

$Q_{кз}$, кг	n_{nk} (обороты) верхнего кольца			F_{m} , кг f	Δl
	2	10	20		
0	-2,2	–	–	–	–
250	2	13/2,6	27/2,7	0,0026	$\frac{2,4}{4}$
500	1,7	12/2,4	24/2,4	0,0026	$\frac{2,1}{6}$
1000	2,5	11/2,2	22/2,2	0,0022	2,3
1500	2,0	10,0/2,0	20,5/2,1	0,0017	$\frac{2,0}{2}$
2000	2,0	10,5/2,1	20,0/2,0	0,0016	$\frac{2,0}{4}$
2500	2,5	10,5/2,1	20,5/2,1	0,0017	$\frac{2,2}{2}$
3000	–	11,5/2,3	20,5/2,1	0,0017	$\frac{2,1}{8}$
сред- нее					2,2

4.3. Обсуждение результатов и выводы

По подшипнику № 8204

1. Среднее значение коэффициента проскальзывания для подшипника №8204 со смазкой получено равным $\bar{\varepsilon} = 0,0317$ 0,0317 или $\bar{\varepsilon} = 3,17\%$ 3,17 %, среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\varepsilon} = 1,73 \cdot 10^{-3}$ 1,73 · 10⁻³; коэффициент вариации $\nu_{\varepsilon} = 0,057$ 0,057 или $\nu_{\varepsilon} = 5,7\%$ 5,7 %.

2. Средний коэффициент проскальзывания без смазки $\bar{\varepsilon} = 0,0364$ 0,0364 на 15 % выше среднего КП со смазкой металлом $\bar{\varepsilon} = 0,0317$ 0,0317 на $\bar{\nu}_{\varepsilon} = 15\%$ 15 %, то есть смазка снижает КП, но не существенным образом.

Таким образом, средний КП для нормально работающего со смазкой УПК № 8204 равен $\mu = 3,17\%$ $\mu = 3,17\%$.

3. При увеличении нагрузки на подшипник в 10 раз, от 5 до 50 кг ПК в подшипнике со смазкой уменьшился, а в подшипнике без смазки увеличился примерно на 10 % в обоих случаях, то есть на незначительную величину. С учетом графиков рис. 4.5. и рис. 4.6. можно считать, что с изменением нагрузки КП меняется незначительно.

4. С увеличением оборотов точки в 10 раз средний КП незначительно ($\mu = 3,3\%$ $\mu = 3,3\%$ 5 – 10 %) возрастает. Очевидно, влияние числа оборотов и нагрузки в изучаемом диапазоне можно пренебрегать и оценивать КП по общему среднему значению $\mu = 3,3\%$ $\mu = 3,3\%$ – 3,5 %.

5. На графиках рис. 4.3. - 4.6. приведены реализации зависимостей $\mu(Q, n: const) = const$ и $\mu(n, Q: const) = const$, из которых следует, что эти зависимости являются реализациями случайного процесса.

Подшипник № 8211

1. Предложенное приспособление к прессу Бринелля позволяет определять величину коэффициента проскальзывания для подшипников больших размеров и при больших нагрузках в условиях малых оборотов.

2. Величина проскальзывания для подшипника № 8211 определена значением $\mu = 0,0778$ $\mu = 0,0778$ 0,0778. Это более чем в 2 раза больше величины проскальзывания для УПК № 8204. Из этого можно сделать вывод, что с увеличением размеров подшипника коэффициент проскальзывания увеличивается.

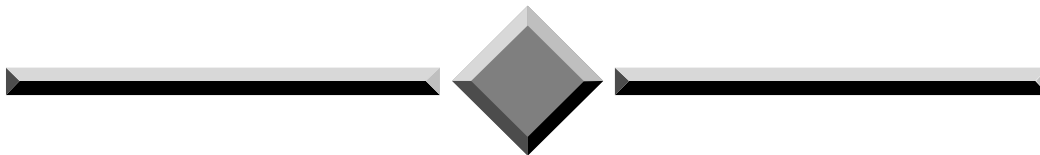
3. Коэффициент трения для УПК № 8211 оценивается величиной 0,0017 – 0,0026.

Общий вывод по разделу 4 заключается в следующем:

Разработан и реализован экспериментальный метод определения величины проскальзывания шариков по дорожкам подшипников качения упорного шарикоподшипника.

Анализ результатов показал, что коэффициент проскальзывания в упорном подшипнике № 204 в среднем равен $\mu = 3,17\%$ $\mu = 3,17\%$ 3,17 %, а в подшипнике большого размера № 8211 $\mu = 7,8\%$ $\mu = 7,8\%$ 7,8 %

Надійшла 18.02.2010



ЧИТАЙТЕ

журнал

“Problems of Tribology”

во всемирной сети

INTERNET !

<http://www.tup.km.ua/science/journals/tribology/>

