

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

*Хмельницкий национальный университет,
 г. Хмельницкий, Украина,
 **Национальный авиационный университет,
 г. Киев, Украина

**РАСЧЕТЫ И ИСПЫТАНИЯ РАДИАЛЬНЫХ
 ШАРИКОПОДШИПНИКОВ НА ИЗНОС.
 ЧАСТЬ II. РЕАЛИЗАЦИЯ
 ЭКСПЕРИМЕНТА И РАСЧЕТОВ**

Содержание

3. Реализация экспериментов и расчетов
 3.1. Условия в контакте и фактические результаты испытаний
 3.1.1. Условия в контакте
 3.1.2. Результаты испытаний
 3.2. Определение параметров модели изнашивания
 3.2.1. Использование способа двух точек, $a_0: 0=0$ при смазке литол-24
 3.2.2. Использование способа двух точек, смазка солидол Ж-2
 3.2.3. Использование метода наименьших квадратов, $a_0: 0=0$
 3.3. Прогнозирование износа стенового образца $a_0: 0=0$
 3.4. Методика прогнозирования износа осевого подшипника
 3.4.1. Расчет приведенного радиуса
 3.4.2. Формулы для расчета износа
 3.5. Прогнозирование износа радиального подшипника 256907 переднего колеса автомобиля ВА3-2108
 3.5.1. Расчетные формулы для приведенного радиуса
 3.5.2. Расчет износа на начальной стадии подшипника ступицы переднего колеса ВА3-2108 (литол-24)
 3.5.3. Расчет износа на начальной стадии подшипника ступицы переднего колеса ВА3-2108 (солидол Ж-2)
 3.6. Прогнозирование износа радиального подшипника заднего колеса 6306 автомобиля ВА3-2107
 3.6.1. Ориентировочное определение параметров k_w и m из эксплуатации
 3.6.2. Расчет износа на начальной стадии подшипника ступицы заднего колеса ВА3-2107, смазка литол-24.
 3.6.3. Расчет износа на начальной стадии подшипника ступицы заднего колеса, смазка солидол Ж-2.

Выводы по части II

3. Реализация экспериментов и расчетов

3.1. Условия в контакте и фактические результаты испытаний

3.1.1. Условия в контакте

1⁰. Были выполнены испытания на износ с определением параметров модели изнашивания при следующих исходных данных:

1) за основу установки был взят базовый осевой шарикоподшипник № 8204: число шариков 12; радиус шарика $R_0: 3,57 = 3,57$ мм; средний диаметр дорожки качения $R_2: R_0: 14,65 = 14,65$ мм;

2) полная осевая нагрузка на подшипник $Q_n: 30 = 30$ кг, нагрузка на один шарик $Q: 2,5 = 2,5$ кг;

3) модуль упругости стали ШХ15: $E: 2,1 \cdot 10^4 = 2,1 \cdot 10^4$ кг/мм², коэффициент Пуассона $\nu: 0,3 = 0,3$;

4) ширина дорожки износа измерялась с точностью до 1 мкм прибором ИЗА-2;

5) испытания при числе оборотов шпинделя $n: 1250 = 1250$; об/мин;

6) путь трения для шарика S_1 определялся по зависимости:

$$S_1 = 2\pi \cdot s_1 \cdot 2R_{\text{ш}}, \quad (3.1.1)$$

для примера при $t = 1$ мин; $s_1 = 2\pi r_1 = 2\pi \cdot 414,65 \cdot 10^{-6} = 0,115 \cdot 10^6$ мм.

2⁰. Покажем, что испытания плоского кольца (вместо кольца осевого подшипника с желобом) в качестве образца выполняются при упругих деформациях.

1. Твердость стали ШХ15 находится в пределах HRC (60...65), что соответствует твердости по Бринеллю HB (600...650) кг/мм².

Предел текучести стали ШХ15 по марочнику сталей при закалке 810 °С и отпуске 150 °С задается величиной $\sigma_T = 167$ кг/мм², то есть:

$$\frac{HB}{\sigma_T} = \frac{600...650}{167} = 3,59...3,89, \text{ или } HB = (3,59...3,89) \sigma_T. \quad (3.1.2)$$

2. Максимальное контактное давление в начале испытаний по Герцу равно:

$$\sigma_0 = 0,388 \sqrt[3]{\frac{QE^2}{R^2}} \cdot \frac{1}{\psi}^{1/3}, \quad (3.1.3)$$

$$\sigma_0 = 0,388 \sqrt[3]{\frac{2,5 \cdot (2,1^2 \cdot 10^8)^2}{3,57^2}} \cdot \frac{1}{\psi}^{1/3} = 262,3 \text{ кг/мм}^2 \text{ или при } E = 1,15 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2; \sigma_p = 115 \text{ кг/мм}^2.$$

3. Условие появления пластичности может быть выражено через предел текучести через соотношение:

$$\sigma_0 \leq 1,613 \sigma_T, \quad (3.1.4)$$

в этом случае: $\frac{\sigma_0}{1,613 \sigma_T} = \frac{262,3}{1,613 \cdot 167} = \frac{262,3}{269,4} = 0,973$, или коэффициент запаса $n = 1,027$.

4. Другой способ оценки возможности пластичности $\sigma_0 \leq HB$; в этом случае коэффициент запаса $n = \frac{HB}{\sigma_0} = \frac{600...650}{262,3} = 2,29...2,48$.

Точность определения коэффициентов запаса определяется точностью определения твердости и предела текучести.

Полагаем, что точность определения твердости выше поэтому в заданных условиях пластические деформации возможны с пренебрежимо малой вероятностью.

3⁰. Начальный размер площадки контакта определяется по формуле Герца для шара на плоскости:

$$a = 1,109 \sqrt[3]{\frac{QR}{E}} \cdot \frac{1}{\psi}^{1/3}, \quad (3.1.5)$$

или
$$a = 1,109 \sqrt[3]{\frac{2,5 \cdot 3,57}{2,1 \cdot 10^4}} \cdot \frac{1}{\psi}^{1/3} = 0,0834 \text{ мм.}$$

3.1.2. Результаты испытаний

1⁰. На первом этапе была поставлена задача отработки предложенной методики испытаний и определения параметров модели изнашивания для двух смазок:

- 1) наиболее часто используемая в ответственных подшипниках качения смазка литол-24;
- 2) менее качественная, но более дешевая и имеющая широкое использование в менее ответственных узлах – смазка солидол Ж-2.

2⁰. Результаты испытаний представлены в табл. 3.1 и на рис. 3.1.

Таблица 3.1

Фактические результаты испытаний

№ п/п	t, мин	s $\cdot 10^6$, мм	Литол-24		Солидол Ж-2	
			2a ₁ , мм	a ₁ , мм	2a ₁ , мм	a ₁ , мм
1	2	3	4	5	6	7
1	0,5	0,0575	0,34	0,170	0,323	0,1615
2	1	0,1151	0,352	0,176	0,378	0,189
3	3	0,3452	0,359	0,1795	0,408	0,204

4	5	0,5753	0,383	0,1915	0,432	0,216
5	10	1,1506	0,403	0,2015	0,453	0,2265
6	20	2,312	0,407	0,2035	0,485	0,2425
7	30	3,4518	0,420	0,210	0,508	0,254
8	60	6,9036	0,452	0,226	0,534	0,267
9	90	10,359	0,458	0,229	0,543	0,2715

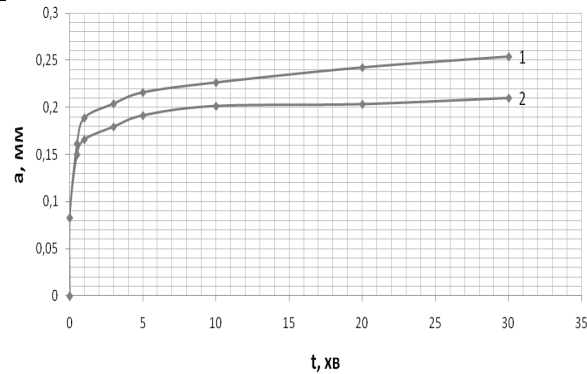


Рис. 3.1 – Зависимости ширины дорожки износа УПК от продолжительности испытаний при разных смазках: 1 – солидол Ж-2; 2 – Литол -24

3.2. Определение параметров модели изнашивания

3.2.1. Использование способа двух точек $a_0 = 0$ при смазке Литол-24

1⁰. Наиболее простой способ определения параметров аппроксимирующей функции:

$$a = cs^\beta \quad (3.2.1)$$

состоит в задании двух точек на кривой через которые пройдет функция $(a_1, s_1), (a_2, s_2)$. В этом случае параметры c и β определяются из зависимостей:

$$\beta = \frac{\lg(a_1/a_2)}{\lg(s_1/s_2)}; \quad c = \frac{a_1}{s_1^\beta} \quad (3.2.2)$$

2⁰. Для литола-24 выбираем из зависимости $a(s)$ точки:

$$a_1 = 0,185 \text{ мм}; s_1 = 0,3452 \cdot 10^6 \text{ мм}; a_2 = 0,201 \text{ мм}; s_2 = 1,1506 \cdot 10^6 \text{ мм}, \text{ тогда}$$

$$\beta = \frac{\lg(0,185/0,201)}{\lg(0,3452/1,1506)} = \frac{0,03602}{0,5228} = 0,0689, \quad c = \frac{a_1}{s_1^\beta} = \frac{0,185}{(0,3452 \cdot 10^6)^{0,0689}} = \frac{0,185}{2,4075} = 0,0768.$$

Значение координат для двух точек функции $a(s)$ определяются по (3.7), например:

$$a(t = 0,5) = 0,0768(0,0575 \cdot 10^6)^{0,0689} = 0,163 \text{ мм}.$$

Параметр модели изнашивания m и k_w определяются по формулам (1.4.5) и (1.4.6):

$$m = 2 \frac{\lg(s_1/s_2)}{\lg(a_1/a_2)} - 5 = 2 \frac{\lg(0,3452/1,1506 \cdot 10^6)}{\lg(0,185/0,201)} - 5 = 24,028,$$

$$k_w = \frac{a_1^{\frac{m+5}{2}}}{\frac{3}{\pi} \frac{Q}{\pi B} \frac{1}{\psi} \frac{m}{R} \frac{3}{2} + 2 \frac{1}{\psi} \frac{B s_1}{\pi R_2}}; \quad k_w = 0,274 \cdot 10^{-35} \text{ (мм}^2/\text{кг)}^m.$$

4⁰. Оценку точности аппроксимации $a(s)$ выполняем сравнением координатных точек, полученных экспериментально и с помощью аппроксимации по двум точкам. Результаты сравнения

представлены в таблице 3.2. Из сравнения следует качественно логичное прохождение аппроксимирующей кривой.

Таблица 3.2

Результаты испытаний и обработка данных по литолу-24 при $a_0 = 0$

№ п/п	t , мин	$s \cdot 10^6$, мм	эксперимент		сглажив. a , мм	по 2-м точкам a_1^p , мм	МНК a^p , мм
			$2a$, мм	a^3 , мм			
1	0,5	0,0575	0,34	0,17	0,139	0,163	0,1684
2	1	0,1151	0,352	0,176	0,17	0,171	0,1749
3	3	0,3452	0,359	0,1795	0,185	0,185	0,1855
4	5	0,5753	0,383	0,1915	0,193	0,1915	0,1907
5	10	1,1506	0,403	0,2015	0,21	0,21	0,1979

3.2.2. Использование способа двух точек при использовании смазки солидол Ж-2

1. Выбор базовых точек по спрямленной кривой:

$$a_1 = 0,204 \text{ мм}; s_1 = 0,3452 \cdot 10^6 \text{ мм}; a_2 = 0,227 \text{ мм}; s_2 = 1,1506 \cdot 10^6 \text{ мм}.$$

2. Определение параметров аппроксимации по (3.2.2):

$$\beta = \frac{\lg(0,204/0,227)}{\lg(0,3452/1,1506)} = 0,0877, \quad c = \frac{a_1}{s_1^\beta} = \frac{0,204}{(0,3452 \cdot 10^6)^{0,0877}} = 0,0667.$$

3. Определение расчетных значений точек для сравнения:

$$a(t = 0,5 \text{ мин}) a(t = 0,5 \text{ с}) = \beta = 0,0667 \cdot (0,0575 \cdot 10^6)^{0,0877} = 0,1744.$$

Результаты сравнения представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Результаты испытаний и обработки данных по солидолу Ж-2 при $a_0 = 0$

№ п/п	t , мин	$s \cdot 10^6$ мм	эксперимент		По сглаженной кривой a , мм	по 2-м точкам a_1^p , мм	МНК a^p , мм
			$2a$, мм	a^3 , мм			
1	0,5	0,0575	0,323	0,1615	0,162	0,1744	0,168
2	1	0,1151	0,378	0,189	0,177	0,1853	0,181
3	3	0,3452	0,408	0,204	0,204	0,204	0,203
4	5	0,5753	0,432	0,216	0,215	0,2134	0,214
5	10	1,1506	0,453	0,2265	0,227	0,2268	0,231

4. Определение параметров модели по (1.4.5), (1.4.6):

$$m = 2 \frac{\lg(s_1/s_2)}{\lg(a_1/a_2)} - 5 = 2 \frac{\lg(0,3452/1,1506 \cdot 10^6)}{\lg(0,204/0,227)} - 5 = 17,5389;$$

$$k_w = \frac{0,204^{11,269}}{40,1138 \cdot 10^6} = 7,765 \cdot 10^{-28}$$

3.2.3. Использование метода наименьших квадратов $a_0 = 0$

Основным недостатком использования способа определения параметров аппроксимации функции износа по двум точкам является влияние выбора пары точек на параметры аппроксимации.

Более точным и однозначным является применение метода наименьших квадратов.

При определении параметров β и c аппроксимирующей зависимости $a(s)$ используются известные расчетные формулы (1.5.5) и (1.5.6).

Для удобства вычислений составляется обычная таблица исходных данных и вспомогательных вычисляемых величин. Вычисления ведутся либо вручную либо на компьютере.

Результаты вычислений для смазок литол-24 и солидол Ж-2 приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Сводная таблица параметры β , c и m , k_w

Параметры	по двум точкам	$a_0 = 0$, МНК	$a_0 = 0,083$ мм, МНК
Литол-24			
β	0,0689	0,0539	0,0986
c	0,0768	0,0933	0,0291
m	24,028	32,27	31,6
k_w	$0,274 \cdot 10^{-35}$	$2,32 \cdot 10^{-46}$	$4,33 \cdot 10^{-45}$
Солидол Ж-2			
β	0,0877	0,1065	0,189
c	0,0667	0,0522	0,01073
m	17,5389	13,89	9,025
k_w	$7,765 \cdot 10^{-28}$	$2,99 \cdot 10^{-23}$	$5,38 \cdot 10^{-17}$

Сглаживание точек аппроксимирующей зависимости и эксперимента представлены в табл. 3.2 и 3.3.

Из сравнения параметров моделей изнашивания m , k_w , полученных при разных способах аппроксимации следует значительное различие.

Однако как показано далее итоговое расхождение оценок износа не является столь существенным. Это может быть объяснено взаимосвязью параметров m и k_w .

3.3. Прогнозирование износа стенового образца

3.3.1. При $a_0 = 0$

1⁰. Расчет износа стенового образца при большой продолжительности испытаний можно производить двумя способами:

1) просто использовать экстраполяцию экспериментальной кривой:

$$a = cs^\beta, \quad (3.3.1)$$

при полученных значениях параметров c и β ;

2) более громоздко для вычислений использовать формулу для расчета износа дорожки качения образцовываемой при качении шара и плоскости:

$$a^{\frac{m+5}{2}} = \frac{Q}{\pi B} \frac{4}{\pi R_1} k_w R_3 \frac{m}{2} + 2 \frac{4}{\pi R_2} \frac{R_1 \epsilon z}{\pi R_2}. \quad (3.3.2)$$

2⁰. Пример. Данные при расчетах по двум точкам для смазки литол-24:

$$\beta = 0,0689; c = 0,0768; t = 90 \text{ мин}; s_1 = (0,11514 \cdot 10^6) = 10,3594 \cdot 10^6 \text{ мм.}$$

Размер площадки износа по (3.3.1): $a = 0,0768 (10,3594 \cdot 10^6)^{0,0689} = 0,2337 \text{ мм.}$

Этот результат хорошо согласуется с расчетами по формуле 3.3.2.

3⁰. Результаты прогнозирования износа стенового образца для разных смазок и разными способами представлены в табл. 3.5.

Эти результаты позволяют дать сравнение износа образца при разных наработках.

Установлено, что наибольшее отношение износа при смазке солидолом к износу при смазке литолом-24 составило 7,02 раза при продолжительности работы 10^5 мин.

Таблица 3.5

Результаты прогнозирования износа стенового плоского образца

t , мин	Литол-24	Солидол Ж-2	Сравнение износа	
			$\frac{a_{\text{Солид}}}{a_{\text{Литол}}}$	$\frac{U_{\text{Солид}}}{U_{\text{Литол}}}$
по двум точкам $a_0 = 0$				
10^2	0,2196	0,2543	1,16	1,35

10^3	0,2573	0,3120	1,21	1,46
10^4	0,3015	0,3827	1,27	1,61
10^5	0,3534	0,4711	1,333	1,78
МНК $a_0 = 0$				
10^2	0,2117	0,276	1,303	1,69
10^3	0,2395	0,352	1,47	2,16
10^4	0,2710	0,450	1,66	2,76
10^5	0,3067	0,574	1,87	3,5
МНК $a_{\text{МН}} 0,083$ мм				
10^2	0,2249	0,324	1,44	2,07
10^3	0,2350	0,451	1,77	3,13
10^4	0,2892	0,627	2,17	4,71
10^5	0,3279	0,870	2,65	7,02

3.4. Методика прогнозирования износа осевого подшипника

3.4.1. Расчет приведенного радиуса

1^0 . В случае, если шар катится не по плоскости, а по поверхности (рис. 3.2), имеющей первоначальную форму желоба или более сложную, в решении (1.3.1) и (1.3.2) необходимо вместо величины радиуса шара R следует в соответствии с методом подобия подставить приведенный эквивалентный радиус по зависимости.

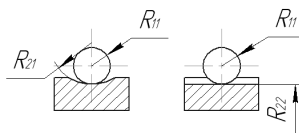


Рис. 3.2 – Схема контакта шара и желоба в осевом подшипнике

$$R = R_* = (R_1^* R_2^*)^{1/2}, \quad (3.4.1)$$

$$\frac{1}{R_1^*} = \frac{1}{R_{11}} - \frac{1}{R_{21}}; \quad \frac{1}{R_2^*} = \frac{1}{R_{11}}, \quad (3.4.2)$$

$$\frac{1}{R_*} = \frac{\text{ж}}{\text{и}} \frac{1}{R_1^* R_2^*} \frac{\text{ц}}{\text{ш}}^{1/2} = \frac{\text{йж}}{\text{ли}} \frac{R_{21} - R_{11}}{R_{11} R_{21}} \frac{\text{ц}}{\text{ш}} \frac{1}{R_{11}} \frac{\text{ц}}{\text{б}}^{1/2}. \quad (3.4.3)$$

Пример: Для подшипника № 8204:

$$R_{11} = 3,57 \text{ мм}; \quad R_{21} = 1,08 R_{11} = 3,86 \text{ мм}; \quad \frac{1}{R_1^*} = \frac{1}{3,57} - \frac{1}{3,86} = 0,02104,$$

$$R_1^* = 47,518 \text{ мм}, \quad R_2^* = 3,57 \text{ мм}, \quad R_* = (47,518 \cdot 3,57)^{1/2} = 13,025 \text{ мм}.$$

3.4.2. Формулы для расчета износа осевого шарикоподшипника

Формулы для расчета износа УПК при наличии k_w и m выполняется по формулам, которые получают после подстановки в них вместо радиуса шарика R приведенного эквивалентного радиуса R_* :

- при $a_0 = 0$ из (1.3.1) имеем:

$$a^{\frac{m+5}{2}} = \frac{\text{ж}}{\text{и}} \frac{Q}{\pi B} \frac{\text{ц}}{\text{ш}}^m k_w R_* \frac{\text{ж}}{\text{и}} \frac{m}{2} + 2 \frac{\text{ц}}{\text{ш}} \frac{B_* \varepsilon z}{\pi R_2} s_1; \quad (3.4.4)$$

- при $a_0 \neq 0$ из (1.3.2) получаем

$$\frac{1}{a^2} \frac{\text{ж}}{\text{и}} a^{\frac{m+4}{2}} - a_0^{\frac{m+4}{2}} \frac{\text{ц}}{\text{ш}} = \frac{\text{ж}}{\text{и}} \frac{Q}{\pi B_*} \frac{\text{ц}}{\text{ш}}^m k_w R_* \frac{\text{ж}}{\text{и}} \frac{m}{2} + 2 \frac{\text{ц}}{\text{ш}} \frac{B_* \varepsilon z}{\pi R_2} s_1. \quad (3.4.5)$$

2108

3.5. Прогнозирование износа радиального подшипника 256907 переднего колеса авт. ВАЗ

3.5.1. Расчетные формулы для приведенного радиуса

1⁰. В соответствии со схемой рис. 3.3 и методом приведенного радиуса для радиального подшипника имеем:

$$R_* = (R_1^* \cup R_2^*)^{1/2}, \quad (3.5.1)$$

$$\frac{1}{R_1^*} = \frac{1}{R_{11}} - \frac{1}{R_{21}}, \quad (3.5.2)$$

$$\frac{1}{R_2^*} = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{22}}, \quad (3.5.3)$$



Рис. 3.3 – Схема контакта в радиальном шарикоподшипнике

В конструкторских нормах для радиальных подшипников рекомендуют:

$$R_{21} = 1,03R_{11}.$$

2⁰. Расчет приведенного радиуса для ПК 256907

Исходные данные: $R_{11} = 5$ мм; $R_{22} = 20,75$ мм. Расчет: $R_{21} = 1,03 \cdot 5 = 5,15$ мм;
 $R_1^* = 171,53$ мм, $R_2^* = 4,029$ мм; $R_* = (171,53 \cup 4,029)^{1/2}$, $R_* = 26,19$ мм.

3⁰. Расчет приведенного радиуса для заднего подшипника ПК 6306 RS автомобиля ВАЗ-2107

Исходные данные: $R_{11} = 6,15$ мм; $R_{22} = 19,35$ мм; $R_{21} = 6,3345$ мм.

Расчет: $R_1^* = 213,77$ мм, $R_2^* = 4,67$ мм; $R_* = (213,77 \cup 4,67)^{1/2}$, $R_* = 31,6$ мм.

3.5.3. Расчет износа на начальной стадии подшипника ступицы переднего колеса ВАЗ-2108 (литол - 24)

1⁰. Расчет подшипника 256907

1. Исходные данные:

$$R_{11} = 5 \text{ мм}; R_{22} = 20,75 \text{ мм}; R_{21} = 6,15 \text{ мм}; R_{np} = 26,29 \text{ мм}; \varepsilon = 0,011; z = 14.$$

Смазка литол-24 ($a_0=0$).

$$2. m = 32,27, k_w = 2,32 \cdot 10^{-46} \text{ (кг/мм}^2\text{)}^m.$$

$$3. \text{ Расчет параметра } B = \frac{3}{\text{и}} \frac{16\pi}{3} \cup \frac{QR_*}{E_*} \cup \frac{1}{\text{ш}}^{1/2}; E_* = 1,1538 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2; R_* = 26,29 \text{ мм};$$

$$Q = 43 \text{ кг}; B = \frac{3}{\text{и}} \frac{16\pi}{3} \cup \frac{43 \cup 26,29}{1,1538 \cdot 10^4} \cup \frac{1}{\text{ш}}^{1/2} = 1,2813.$$

4. $t = 10$ мин.

2⁰. Расчет износа СПК автомобиля ВАЗ-2108 за 1-й час работы при скорости 60 км/час:

$$1) s_1 = 2\pi \cup R_{cp} \cup 60 \cup 600 = 2\pi \cup 20,75 \cup 36000 = 4,69 \cdot 10^6 \text{ мм};$$

2) формула для расчета:
$$a_1^{\frac{m+5}{2}} = \frac{3}{\pi} \frac{Q}{B} \frac{1}{\pi} k_w R_* \frac{m}{2} + 2 \frac{B_s \varepsilon z}{\pi R_{cp}}$$

$$a_1^{\frac{32,27+5}{2}} = \frac{3}{\pi} \frac{43}{\pi} \frac{1}{\pi} 2,32 \cdot 10^{-46} \cdot 26,29 \frac{32,27}{2} + 2 \frac{1,2813 \cdot 44,69 \cdot 10^6 \cdot 40,011 \cdot 14}{\pi \cdot 420,75}$$

$$a_1^{\frac{32,27+5}{2}} = 1,567 \cdot 10^{33} \cdot 1,101 \cdot 10^{-43} \cdot 1,4196 \cdot 10^4 = 2,449 \cdot 10^{-6},$$

$$a_1 = (2,4 \cdot 10^{-6})^{\frac{1}{21,35}} = 0,542 \text{ мм}; \quad a_1 = 0,542 \text{ мм}.$$

Изменение зазора соответствующее этому износу:

$$\Delta_n = U_w = \frac{a^2}{2R} = \frac{0,542^2}{2 \cdot 45} = 0,0293 \text{ мм}.$$

3.5.4. Расчет износа на начальной стадии подшипника ступицы переднего колеса ВАЗ-2108 (солидол Ж-2)

1⁰. Расчет подшипника 256907

1. Исходные данные:

$$R_{11} = 5 \text{ мм}; \quad R_{22} = 20,75 \text{ мм}; \quad R_{21} = 6,15 \text{ мм}; \quad R_{np} = 26,29 \text{ мм}; \quad \varepsilon = 0,011; \quad z = 14.$$

$$m = 13,89, \quad k_w = 2,99 \cdot 10^{-23} \text{ (кг/мм}^2\text{)}^m; \quad t = 60 \text{ мин};$$

2. Расчет параметра B_* :

$$B_* = \frac{3}{\pi} \frac{16\pi}{3} \frac{Q R_*}{E_*} \frac{1}{2},$$

$$E_* = 1,1538 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2, \quad R_* = 26,29 \text{ мм}, \quad Q = 43 \text{ кг}; \quad B_* = \frac{3}{\pi} \frac{16\pi}{3} \frac{43 \cdot 26,29}{1,1538 \cdot 10^4} \frac{1}{2} = 1,2813.$$

Расчет износа СПК автомобиля ВАЗ-2108 за 1-й час работы при скорости 60 км/час:

1) путь трения $s_1 = 2\pi \cdot 4R_{cp} \cdot 60 \cdot 60 = 2\pi \cdot 420,75 \cdot 36000 = 4,69 \cdot 10^6 \text{ мм};$

2) расчет износа по формуле:
$$a_1^{\frac{m+5}{2}} = \frac{3}{\pi} \frac{Q}{\pi B} \frac{1}{\pi} k_w R_* \frac{m}{2} + 2 \frac{B_s \varepsilon z}{\pi R_{cp}}$$

$$a_1^{\frac{13,89+5}{2}} = \frac{3}{\pi} \frac{43}{\pi} \frac{1}{\pi} 2,99 \cdot 10^{-23} \cdot 26,29 \frac{13,89}{2} + 2 \frac{1,2813 \cdot 44,69 \cdot 10^6 \cdot 40,011 \cdot 14}{\pi \cdot 420,75}$$

$$a_1^{9,445} = 0,01938, \quad a_1 = (0,01938)^{0,1059}; \quad a_1 = 0,6587 \text{ мм}.$$

Изменение зазора: $\Delta_n = U_w = \frac{a^2}{2R} = \frac{0,6587^2}{2 \cdot 45} = 0,04338 \text{ мм}.$

Таблица 3.6

Сравнение износа переднего подшипника 256907 при разных смазках на начальной стадии

Параметры	Литол-24 a , мм	Солидол Ж-2 a , мм	Отношение $\frac{a_{\text{Солид}}}{a_{\text{Литол}}}$
a_1 , мм	0,542	0,659	1,216
Δ , мм	0,0293	0,04338	-

Сравнение износа переднего подшипника ступицы колеса, показывает, что на начальной стадии работы (первые 10 мин) подшипник смазываемый смазкой солидол ж-2 изнашивается только в 1,216 раза больше чем при смазывании литолом-24

3.6. Прогнозирование износа радиального подшипника заднего колеса 6036 RS автомобиля ВАЗ-2107

3.6.1. Ориентировочное определение параметров k_w и m по данным из эксплуатации для подшипника 6036 RS

$$a^{\frac{m+5}{2}} = \frac{Q}{\pi B} \frac{d}{d_2} k_w R \frac{m}{2} + 2 \frac{B s_1 \varepsilon z}{\pi R_2} \quad (3.6.1)$$

Данные по износу СПКз в эксплуатации.

1⁰. Предельный износ:

1) начальный зазор подшипника 6036 RS [1]: $\Delta = R_2 - R_1 = 0,05 = 50$ мкм;

2) конечный предельный зазор в ступичном подшипнике [2]: $\Delta_{np} = 0,25$ мм;

3) предельный радиальный износ подшипника: $U_w = \Delta_{np} - \Delta = 0,25 - 0,05 = 0,2$ мм.
 $U_w: 1 - 1: 0,25 - 0,05: 0,2 \text{ мм} \cdot 200 \text{ мкм}.$

2⁰. Срок службы в мм пути трения в РПК:

1) срок службы в км пробега: $L = 40 - 100$ тис. км;

2) при скорости автомобиля 60 км/час продолжительность пробега до предельного износа:

$$t_{cp} = \frac{60000}{60} = 1000 \text{ ч};$$

3) путь трения шарика s_1 :

$$s_1 = 2\pi \frac{d}{d_2} R_{cp} \frac{d}{d_2} \frac{d}{d_2} t = 2\pi \frac{d}{d_2} \frac{d}{d_2} \frac{d}{d_2} 9,35 \frac{d}{d_2} 600 \frac{d}{d_2} 60 \frac{d}{d_2} 1000 = 4,3769 \frac{d}{d_2} 10^9 \text{ мм} \approx 4,4 \frac{d}{d_2} 10^9 \text{ мм}.$$

3⁰ Выбор промежуточной точки:

1) при $s_{11} = 2 \frac{d}{d_2} 10^9$ мм примем износ равным $U_w = 0,12$ мм, это соответствует размеру дорожки качения: $a_1 = (2U_w R)^{\frac{1}{2}} = (2 \cdot 0,12 \cdot 6,15)^{\frac{1}{2}} = 1,2149$ мм.

2) при $s_{12} = 4,4 \frac{d}{d_2} 10^9$ мм примем износ равным $U_w = 0,2$ мм, что соответствует размеру дорожки качения: $a_2 = (2 \cdot 0,2 \cdot 6,15)^{\frac{1}{2}} = 1,5684$ мм.

4⁰. Записываем зависимость (1.3.1) для средней a_1 и для конечной a_2 точек:

$$\begin{aligned} a_1^{\frac{m+5}{2}} &= \frac{Q}{\pi B} \frac{d}{d_2} k_w R \frac{m}{2} + 2 \frac{B s_{11} \varepsilon z}{\pi R_2} \\ a_2^{\frac{m+5}{2}} &= \frac{Q}{\pi B} \frac{d}{d_2} k_w R \frac{m}{2} + 2 \frac{B s_{12} \varepsilon z}{\pi R_2} \end{aligned} \quad (3.6.2)$$

Решая систему находим:

$$\frac{a_1^{\frac{m+5}{2}}}{a_2^{\frac{m+5}{2}}} = \frac{s_{11}}{s_{12}}, \quad (3.6.3)$$

отсюда:

$$m = 2 \frac{\lg(s_{11}/s_{12})}{\lg(a_1/a_2)} - 5. \quad (3.6.4)$$

Из первого уравнения (2) имеем:

$$k_w = \frac{a_1^{\frac{m+5}{2}}}{\frac{3}{\pi} \frac{Q}{B_*} \frac{4}{\psi} R_* \frac{3}{2} \frac{m}{2} + 2 \frac{4}{\psi} \frac{B_* s_{11} \varepsilon z}{\pi R_2}} \quad (3.6.5)$$

5⁰. Реализация расчетов

1. Определение параметра m :

Исходные данные: $s_{11} = 2 \cdot 10^9$ мм; $a_1 = 1,2149$ мм, $s_{12} = 4,4 \cdot 10^9$ мм; $a_1 = 1,5684$ мм.

Определение m по (3.6.4): $m = 2 \frac{\lg(2 \cdot 10^9 / 4,4 \cdot 10^9)}{\lg(1,2149 / 1,5684)} - 5 = 1,17$; $m = 1,17$.

2. Определение параметра k_w по (3.6.5):

$$k_w = \frac{1,2149^{\frac{1,17+5}{2}}}{\frac{3}{\pi} \frac{163,05}{2,7359} \frac{4}{\psi} \frac{1,17}{2} + 2 \frac{4}{\psi} \frac{2,7359 \cdot 2 \cdot 10^9 \cdot 0,01148}{\pi \cdot 9,35}} = \frac{1,2149^{3,085}}{2,5556 \cdot 10^3 \cdot 47,92 \cdot 10^6} =$$

$$= \frac{1,8231}{2,024 \cdot 10^{10}} \quad K_w = 9,007 \cdot 10^{-11} \text{ (мм}^2/\text{кг)}^m.$$

6⁰. Расчет k_w и m выполненный по разработанной методике для данных, ориентировочно взятых из эксплуатации, с целью оценить эксплуатационные значения параметров k_w и m .

Порядки величин k_w : 10^{-11} при m ; 1 дает оценку интенсивности износа ПК в эксплуатации и указывает на адекватность рассматриваемой модели износа подшипника.

3.6.2. Расчет износа на начальной стадии подшипника ступицы заднего колеса автомобиля ВАЗ-2107 смазка литол-24

1⁰. Расчет подшипника 6306 RS

1. Исходные данные: $R_{11} = 6,15$ мм; $R_{22} = 19,35$ мм; $R_{21} = 6,3345$ мм; $R_{np} = 31,6$ мм; $\varepsilon = 0,011$; $z = 8$; $m = 32,27$, $k_w = 2,32 \cdot 10^{-46}$ (кг/мм²)^m, $t = 60$ мин.

2. Расчет параметра B :

$$B = \frac{3}{\pi} \frac{16\pi}{3} \frac{Q R_*}{E_*} \frac{4}{\psi}^{\frac{1}{2}}, \quad (3.6.6)$$

$$E_* = 1,1538 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2; R_* = 31,6 \text{ мм}; Q = 163,05 \text{ кг}; B = \frac{3}{\pi} \frac{16\pi}{3} \frac{163,05 \cdot 31,6}{1,1538 \cdot 10^4} \frac{4}{\psi}^{\frac{1}{2}} = 2,7359.$$

Расчет износа СПКЗ автомобиля ВАЗ-2107 за 1-й час работы при скорости 60 км/час:

$$1) s_1 = 2\pi \cdot 4 R_{cp} \cdot 60 \cdot 600 = 2\pi \cdot 4 \cdot 9,35 \cdot 36000 = 4,38 \cdot 10^6 \text{ мм};$$

$$2) a_1^{\frac{m+5}{2}} = \frac{3}{\pi} \frac{Q}{B} \frac{4}{\psi}^m k_w R_* \frac{3}{2} \frac{m}{2} + 2 \frac{4}{\psi} \frac{B s_1 \varepsilon z}{\pi R_{cp}} \quad (3.6.7)$$

$$a_1^{\frac{32,27+5}{2}} = \frac{3}{\pi} \frac{163,05}{2,7359} \frac{4}{\psi}^{32,27} \cdot 2,32 \cdot 10^{-46} \cdot 31,6 \frac{3}{2} \frac{32,27}{2} + 2 \frac{4}{\psi} \frac{2,7359 \cdot 4,38 \cdot 10^6 \cdot 0,01148}{\pi \cdot 9,35},$$

$$a_1 = (4,039 \cdot 10^2)^{0,0537} = 1,38 \text{ мм},$$

Величины изменения зазора определяются из соотношения: $\Delta = \frac{a^2}{2R} = \frac{1,38^2}{2 \cdot 6,15} = 0,1548 \text{ мм}.$

3.6.3. Расчет износа на начальной стадии подшипника ступицы заднего колеса автомобиля ВАЗ-2107 смазка солидол Ж-2

1⁰. Расчет подшипника 6306 RS

1. Исходные данные:

$$R_{11} = 6,15 \text{ мм}; R_{22} = 19,35 \text{ мм}; R_{21} = 6,3345 \text{ мм}; R_{np} = 31,6 \text{ мм},$$

$$\varepsilon = 0,011; z = 8, m = 32,27, k_w = 2,32 \cdot 10^{-46} \text{ (кг/мм}^2\text{)}^m, t = 60 \text{ мин.}$$

2. Расчет параметра $B_* = \frac{\sqrt[3]{16\pi Q R_*}}{3 E_* \sqrt[3]{\psi}}$, $E_* = 1,1538 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2$, $R_* = 31,6 \text{ мм}$,

$$Q = 163,05 \text{ кг}, B = \frac{\sqrt[3]{16\pi Q}}{3 \sqrt[3]{1,1538 \cdot 10^4}} \sqrt[3]{\frac{163,05 \cdot 31,6}{1,1538 \cdot 10^4}} = 2,7359.$$

Расчет износа СПКз автомобиля ВАЗ-2107 за 1-й час работы при скорости 60 км/час:

1) $s_1 = 2\pi \sqrt[3]{R_{cp}} \sqrt[3]{60 \cdot 600} = 2\pi \sqrt[3]{9,35 \cdot 36000} = 4,38 \cdot 10^6 \text{ мм.}$

2) $a_1^{\frac{m+5}{2}} = \frac{\sqrt[3]{Q}}{\pi B \sqrt[3]{\psi}} k_w R_*^{\frac{m}{2}} + 2 \frac{\sqrt[3]{B s_1 \varepsilon z}}{\pi R_{cp}}$,

$$a_1^{\frac{13,89+5}{2}} = \frac{\sqrt[3]{163,05}}{\pi \cdot 2,7359 \sqrt[3]{\psi}} \cdot 2,99 \cdot 10^{-23} \sqrt[3]{31,6} \cdot \frac{\sqrt[3]{13,89}}{2} + 2 \frac{\sqrt[3]{2,7359 \cdot 4,38 \cdot 10^6 \cdot 0,011 \cdot 8}}{\pi \cdot 9,35},$$

$$a_1 = (1,68 \cdot 10^2)^{0,1059} = 1,72 \text{ мм},$$

Изменение зазора: $\Delta = \frac{a^2}{2R} = \frac{1,72^2}{2 \cdot 9,35} = 0,2405 \text{ мм.}$

Таблица 3.7

Сравнение износа подшипника 6306 RS заднего колеса ВАЗ-2107 при разных смазках на начальной стадии

Параметры	Литол-24	Солидол Ж-2	Отношение: $\frac{a_{\text{Солидол}}}{a_{\text{Литол}}}$
a , мм	1,38	1,72	1,246
Δ , мм	0,1548	0,2405	1,5536

Таким образом оценка эффективности литола-24 по сравнению с солидолом на переднем и заднем колесах хорошо согласуются $1,216 \approx 1,246$.

Таблица 3.8

Сравнение износа подшипников переднего и заднего колеса автомобилей ВАЗ на начальной стадии эксплуатации при разных смазках

Параметры	Литол-24		Солидол Ж-2		Отношение: $\frac{a_{\text{Солидол}}}{a_{\text{Литол}}}$
	a , мм	Δ , мм	a , мм	Δ , мм	
Переднее колесо ВАЗ-2107	0,542	0,0293	0,6587	0,0434	1,215
Заднее колесо ВАЗ-2107	1,38	0,1548	1,72	0,2405	1,246
Отношение	2,546	5,283	2,611	5,541	-

Из таблицы сравнения полученных результатов следует:

- 1) при работе на начальной стадии при смазке солидол износ выше чем при смазке литолом-24 на переднем колесе в 1,215 раз на заднем в 1,246 раза, то есть ориентировочно на 20%;
- 2) износ заднего колеса при обеих смазках в 2,5-2,6 раза выше чем износ переднего колеса.

Выводы по части II

Разработан и реализован метод испытаний на износ в условиях качения шариков с проскальзыванием.

Реализация метода показала его работоспособность и эффективность и выявились следующие особенности методики. В процессе реализации и получены следующие результаты.

1. На первом этапе испытаний (подъем) наблюдается крутое восхождение зависимости площадки $a(s)$ от пути трения (времени).

Расчет показывает, что в выбранных условиях этот подъем не объясняется пластическими деформациями, так как протекает при давлениях, в 2,5 раза меньших твердости.

2. В начальный момент расчетный размер площадки контакта ($a_{\text{нм}} 0,083$ мм) соизмерим с размером образующейся дорожкой износа, по крайней мере в течении первого часа испытаний (0,25 - 0,30 мм).

В связи с этим при изучении начальных стадий износа необходимо учитывать ход $a(s)$ от точки $a = a_0$.

3. В математическом отношении изменения площадки контакта износа – процесс тонкий и однозначный. Например, $a(s)$ не может быть прямой линией. Любое гладкое прохождение $a(s)$ при степенной аппроксимации соответствует конкретным значениям параметров k_w, m модели.

Поэтому к определению параметров β и c степенной аппроксимации функции $a(s)$ следует относиться очень осторожно: значения параметров k_w, m очень чувствительны к изменениям параметров β и c .

4. Простейшим способом определения параметров β и c является способ двух точек: на экспериментальной кривой выбираются две точки, через которые проводится график аппроксимирующей функции. Этот метод продельно прост, но имеет существенный недостаток: выбор точек влияет на величины β, c и соответственно на величины k_w, m . Заметим, что применение способа двух точек обязательно должно предшествовать процедуре сглаживания кривой, проходящей через эти точки или в окрестности этих точек.

5. Наиболее эффективным методом определения параметров аппроксимирующих функций является метод наименьших квадратов (МНК). Возможно применение МНК при ручном счете на калькуляторе. Но это кропотливый процесс, часто приводящий к арифметическим ошибкам. Следует безусловно при реализации МНК использовать компьютерный счет, например, с применением пакета Mathcad.

6. Выполнено сравнение разных способов аппроксимации для полученных экспериментальных данных оценено их влияние на конечный результат.

Отмечается существенное влияние способа определения β и c на их величину и на k_w и m .

Однако решающим критерием оценки влияния способа определения этих параметров является сравнение их по конечной величине износа (размер ширины дорожки).

7. Конечной целью данной работы является прогнозирование износа шарикоподшипников.

На первом этапе отработки метода прогнозирования является предсказание износа стенового образца на время большее, чем продолжительность проведенных испытаний.

Расчет ожидаемого износа образца при разных смазках и длительных испытаниях дало возможность сравнивать эффективность смазок при длительных испытаниях.

Установлено что способ определения параметров аппроксимации влияет на конечный результат сравнения, однако не решающим образом.

Так учет начальной площадки контакта изменяет ожидаемый размер площадки контакта в диапазоне от 1,1 до 1,42 раза (табл.3.5). Сравнивая с влиянием этих способов на параметры β, c, k_w, m по таблице 3.4, отмечаем, что конечное значение прогнозируемого износа зависит от способов аппроксимации в гораздо меньшей степени, чем β, c, k_w, m .

8. Прогнозирование износа радиальных шарикоподшипников переднего и заднего колеса автомобилей типа ВАЗ, выполнено с использованием: полученных параметров k_w, m модели изнашивания для разных смазок и методом приведенного эквивалентного радиуса и квазигерцевского метода показало:

- 1) работоспособность разработанной системы методов;
- 2) возможность сравнивать эффективность разных видов смазки в радиальных шарикоподшипниках.

9. Установлено, что на начальной стадии работы износ подшипника заднего колеса ВАЗ-2107 (табл. 3.6) по прогнозу в 5 раз выше износа переднего колеса ВАЗ-2108.

Подчеркнем, что прогноз относится к самой начальной стадии эксплуатации. При этом влияние вида смазки является не существенным.

10. Наконец, интересным представляется впервые полученная ориентировочная расчетная оценка интенсивности износа заднего колеса автомобиля ВАЗ-2107 в эксплуатации: параметры модели получены $m = 1,17$, $K_w = 9 \cdot 10^{-11}$ (мм²/кг)^m.

Этот результат указывает на принципиальную возможность, используя предложенную модель, количественно описывать процесс изнашивания подшипников ступиц колес автомобиля на износ по данным взятым из эксплуатации.

Литература

1. Кузьменко А.Г. Метод решения квазигерцевских задач (QH – метод) // Проблемы трибологии. – 2005. – № 3, 4. – С. 139-177.
2. Кузьменко А.Г. Метод решения квазигерцевских контактных задач с учетом износа (QH_w – метод) // Проблемы трибологии. – 2006. – №1. – С. 49-75.
3. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наукова думка, 1988. – 736 с.
4. Кузьменко А.Г. Проскальзывание в подшипниках качения. Часть I. Общие положения // Проблемы трибологии. – 2010. – № 2. – С. 61-72.
5. Кузьменко А.Г., Криворотько В.М., Савчук А.Е. Проскальзывание в подшипниках качения. Часть II. Экспериментальное определение коэффициентов проскальзывания // Проблемы трибологии. – 2010. – № 2. – С. 73-82.
6. Кузьменко А.Г., Криворотько В.М. Расчеты и испытания на износ и надежность упорных шарикоподшипников качения (УПК) // Проблемы трибологии. – 2009. – № 4. – С. 30-52.
7. Кузьменко А.Г., Криворотько В.М. Распределение нагрузки между шариками в радиальном подшипнике качения // Проблемы трибологии. – 2010. – № 1. – С. 29-41.
8. Кузьменко А.Г., Криворотько В.М. Контактная механика плоской комбинированной опоры при одновременном качении шариков и скольжении плоскости // Проблемы трибологии. – 2010. – №1. – С. 86-97.

Надійшла 10.06.2010