

**Кузьменко А.Г.**Хмельницький національний  
університет,  
м. Хмельницький, Україна  
E-mail: kuzmenko-36@mail.ru**МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ  
ГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ  
СМАЗОК НА ИЗНОС**

УДК 621.891

В работе рассмотрены методы и результаты испытаний граничного слоя пластических смазок на износ

**Ключевые слова:** граничный слой, пластичные смазки, износ, методы расчета

**1. Состояние проблемы и постановка задач.**

1.1 *Общие понятия, допущения, и общая задача.*

1) смазывание основной способ, снижения износа рабочих твердых поверхностей узлов трения.  
2) при этом время работы в зависимости от пути трения  $S$  толщина  $h(s)$  граничного слоя изменяется  $h(s)$ , уменьшаясь от начального значения  $h(s=0)$  до нуля  $h(s=s_*)=0$ ;

3) измерения толщины граничного слоя в процессе испытаний  $h(s)$  трудоемкий процесс, контроль, которого в процессе испытаний выполнять нереально.

4) в связи с этим возникает необходимость в способе косвенной оценки  $h(s)$ , например через силу трения  $F(s)$ ; очевидно в соответствии с общей теорией смазки по Ньютону, чем меньше толщина слоя  $h(s)$  тем больше сила трения  $F(s)$ ;

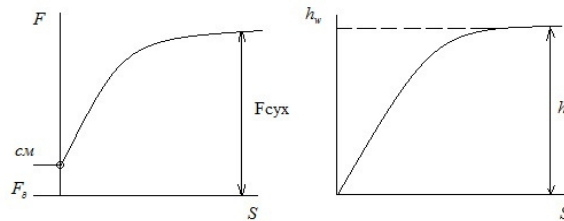
5) обозначим износ смазки  $\Delta h(s)$  так, что:

$$h_w s = \Delta h(s) = h(s) - h_0 \quad (1.1)$$

При этом полагаем, что в первом приближении зависимость износа смазки оси пути трения линейная

$$h_w(s) = kF(s) \quad (1.2)$$

$$\text{где } F(s) = cs^\beta \text{ очевидно } \beta < 1; \quad (1.3)$$



**Рис. 1.1— Зависимости силы трения и толщины смазки от пути трения.**

6) в результате может быть исследована модель износа слоя в форме

$$F(s) = h_w(\sigma, s) = k_w \sigma^m s^n; \quad (1.4)$$

7) в первом приближении можно положить  $n = 1$ . Зависимость износа оси пути трения, указывающая на неустановившийся характер процесса изнашивания при  $n \neq 1$ ;

8) главная задача состоит в определении параметров  $k_w, n, m$  по результатам испытаний с целью количественного сравнения износа разных смазок с учетом давления  $\sigma$  и пути трения  $S$ .

1.2 *О первой работе [1] автора по износу смазки.*

1) В работе [2] впервые было предложено использовать схему: верчение шара в сферической полости, разделенных слоем граничной смазки использовать как метод испытаний смазки на износ в реверсивном режиме.

2) использовался шар  $d_{ш} \text{ мм} 30$ , верчение риалом  $L_{ш} \text{ мм} 20$  привод оси кривошипа и двигателя постоянного тона; нагружения оси пресса Бринелля в диапазоне  $187,5 \text{ кг} - 2000 \text{ кг}$ .

3) в соответствии с законом Ньютона для течения жидкости между твердыми поверхностями полагали, что толщина масляной пленки обратно пропорциональна напряжений (и силе) трения.

В результате испытаний было установлено:

4) принципиальная возможность учитывать измерений толщины граничной смазки через измерения силы трения.

5) целесообразность использования в качестве меры измерения толщины пленки относительную величину – отношения сил трения.

6) оставался нерешенным при испытаниях вопрос учета разных факторов: давления, путь трения, скорость скольжения и т.д., т.н.

В работе [1] не было предельна модель изнашивания пленки.

1.3 Рейтинговые испытания а износ пластических смазок [2];

Развитие метода испытаний

1) в части схемы и оборудования методика испытания соответствует методике [1].

2) в теоретической части в [2] ставится задача сравнения разных видов смазок при использовании простейшей двух факторной ( $\sigma, S$ ), двух параметрической ( $k_w, m$ ) модели установившегося изнашивания.

$$h_w = k_w \sigma^m S \quad (1.5)$$

3) получена зависимость для определения параметров  $k_w, m$  по результатам испытаний;

4) Проведены испытания 12 видов пластических смазок:

5) сравнение смазок выполнено по приближенному критерию-числу циклов или пути трения  $S$ , при которых в одинаковых силовых и кинематических условиях сила трения становится равной силе трения без смазки

$$h_i(s, F_{cm}(s)) = n(s = 0, F_{cух}) \quad (1.6)$$

был сделан вывод высокой эффективности предложенного экспресс-метода испытаний граничного слоя пластических смазок на износ в заданных одинаковых для всех смазок условия, получен рейтинг износостойкости пластических смазок;

6) в частности установлено, что пластическая смазка Мобил в 30 раз дольше работает до предельного состояния в сравнении с солидолом.

1.4 Замечания и перспективы:

1) для повешения точности метода испытаний необходимо совершенствование модели изнашивания с учетом трех основных факторов  $\sigma, S, V$ ;  $V$ -скорость;

2) так, чтобы стало возможным прогнозировать износ смазки в реальных условиях с учетом: давления  $\sigma$  пути трения  $S$ , скорость скольжения  $V$ , кинематики сопряжения: непрерывного, реверсивного движения;

На решения еще не решенных указанных задач направлена данная работа.

1.5 Систематизация задач испытания смазок на износ.

I. Задачи испытаний и определения параметров моделей можно разделить по следующим направлениям.

1. по схеме испытаний.

- 1) вращения шара в сферической полости;
- 2) вращения шара в сферической полости;
- 3) скольжения шара на полости;
- 4) вращения цилиндра в цилиндрической полости;
- 5) четырехшариковая схема;

2. по виду движения образца;

- 1) непрерывное в одном направлении;
- 2) реверсивное;
- 3) для цилиндра: левое, вращательное.

3. по моделям и факторам учитываемых в модели;

1)  $\sigma$  - давления;  $S$  - путь трения;  $V$  - скорость скольжения;  $T$  - температура.

2) двухфакторная  $\sigma, S$ , двухпараметрическая  $k_w, m$  модель первого уровня.

$$h_w = k_w \sigma^m S \quad (1.4)$$

3) двухфакторная трехпараметрическая

$$h_w = k_w \sigma^m S^n \quad (1.5)$$

4) трехфакторная четырехпараметрическая

$$h_w = k_w \sigma^m V^n S^l; \quad (1.6)$$

5) трехфакторная трехпараметрическая (учет скорости)

$$h_w = k_w \sigma^m V^n S; \quad (1.7)$$

б)трехфакторная трехпараметрическая (учет температуры T)

$$h_w = k_w \sigma^m T^n S \quad (1.8)$$

4. По видам смазок 1) пластинные 2) масла

5. Задачи расчетов узлов трения с определением степени изношенности смазки или приработки. Узлы трения.

- 1) подшипники скольжения;
- 2) подшипники качения;
- 3) направляющие ( плоские, цилиндрические)

6.Применяющие модели n 1, n 3

Цели расчетов и испытаний.

1) определение времени до замены смазки.  
2) разработка времени мероприятий по повышению износостойкости узлов трения путем разработки методов восстановления смазки в узле;

3) итоги предварительных исследований указанных на: необходимость разработки методов восстановления пластинки смазок , как на главный вопрос повешения износостойкости узлов трения с пластическими смазками:

- 4) эти методы с периодическим смазыванием.
- 5) методы с автоматическими смазыванием.

## 2. Теория определения параметров модели изнашивания смазок.

2.1 Модель и задача эксперимента

1) принимаем двух факторную трехпараметр

$$\bar{F} = h_w = k_w \sigma^m s^\beta \quad (2.1)$$

$$\text{где } h_w = \frac{h_0 - h_w}{h_w} = k\bar{F}, \bar{F} = \frac{F}{F_0}; \quad (2.2)$$

2) схема испытания: вращения шара в сферической полости т.е при заданной нагрузке Q давления величина постоянная определяемая по зависимости:

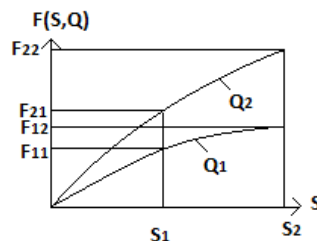
$$\sigma = \frac{Q}{\pi a^2} \quad (2.3)$$

где a - радиус трения площади контакта  
направление вращения постоянное в одну сторону ;

3) задача эксперимента состоит в определении параметров  $k_w, m, n$  модели (2.1) по результатам испытаний

2.2 План эксперимента

- 1) Для определения трех параметров  $k_w, m, n$  необходимо иметь три базовые точки.
- 2) выбираем схему испытания по рис 1.



Испытания смазки на износ с определением сил трения выполнены при двух нагрузке  $Q_1$  и  $Q_2$  .

3) при каждой нагрузке снимаем зависимость сил трения от пути трения  $F(S)$  .

2.3 Вывод соотношения для определения параметров  $k_w, m, s$ .

1.Определения параметров  $\beta$

1) Запишем (2.1) для точек  $(F_{11}, S_1), (F_{12}, S_2)$

$$F_{11} = k_w \sigma_1^m s_1^{\beta 1}; F_{12} = k_w \sigma^{m1} S_2^{\beta 1} \quad (2.4)$$

2) взяв отношения в (2.4) имеем:

$$\frac{F_{11}}{F_{12}} = \frac{\text{Ж} S_1 \text{Ц}}{\text{И} S_2 \text{Ш}}^{\beta_1} \quad (2.5)$$

отсюда:

$$\beta_1 = \frac{\lg F_{11}/F_{12}}{\lg S_1/S_2} \quad (2.6)$$

3) аналогичным образом для точек:  $(F_{21}, S_1), (F_{22}, S_2)$  имеем:

$$\beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg S_1/S_2} \quad (2.7)$$

4) параметры  $\beta_1, \beta_2$  разные, зависящие от нагрузки; в первом приближении можно взять: среднее значение

$$\beta_\phi = (\beta_1 + \beta_2) / 2 \quad (2.8)$$

2. Определение параметров  $k_w, m$ .

1) возьмем две базовые точки

$(F_{12}, S_2), (F_{22}, S_2)$  далее по модели

$$F(S, Q) = k_w \sigma^m S^\beta \quad (2.9)$$

имеем уравнение

$$F_{12} = k_w \sigma_1^m S_2^\beta; F_{22} = k_w \sigma_2^m S_2^\beta \quad (2.10)$$

2) решая (2.10) имеем

$$m = \frac{\lg F_{12}/F_{22}}{\lg (\sigma_1/\sigma_2)} \quad (2.11)$$

3) параметр  $k_w$  из первого уравнения (2.10) имеем

$$k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^\beta} \quad (2.12)$$

2.4 Сравнение износа разных смазок.

1) запишем модель (2.1) для двух разных смазок:

$$\bar{F}_1 = k_{w1} \sigma^{m_1} S^{(\beta)_1}; \bar{F}_2 = k_{w2} \sigma^{m_2} S^{(\beta)_2} \quad (2.13)$$

2) взяв соотношение (2.13) имеем при одинаковых  $\sigma$

$$\frac{\bar{F}_1}{\bar{F}_2} = \frac{k_{w1}}{k_{w2}} (\sigma)^{m_1 - m_2} (S)^{\beta_1 - \beta_2} \quad (2.14)$$

3) если в первом приближении принять  $\beta_1 - \beta_2 = 1$  то из (2.14) имеем:

$$\frac{\bar{F}_1}{\bar{F}_2} = \frac{k_{w1}}{k_{w2}} (\sigma)^{m_1 - m_2} \quad (2.15)$$

### 3. Рейтинговое оценивание износостойкости пластических смазок

#### 3.1 Теоретическое соотношение и методика

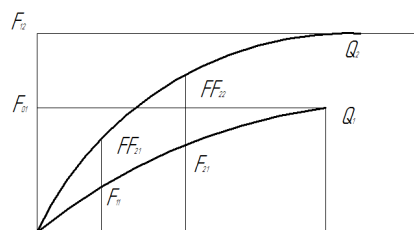


Рис. 3.1—Схема опыта

#### 3.1.1 Термины

- 1)  $F_{01}$  - сила трения без смазки при нагрузке  $Q_1$ ;
- 2)  $F_{02}$  - сила трения без смазки при нагрузке  $Q_2$ ;
- 3)  $F_{11}$  - сила трения при нагрузке  $Q_1$  со смазкой после работы в течение  $t_1$  минут  $F_{11}(Q_1, t_1)$ ;
- 4)  $F_{12}$  - тоже после  $t_2$  минут  $(F_{12}(Q_1, t_2))$ ;
- 5)  $F_{21}(Q_2, t_1)$  - сила трения при нагрузке  $Q_2$  после работы в течение  $t_1$  минут;
- 6)  $F_{22}(Q_2, t_2)$  - тоже после работы в течение  $t_2$  минут;
- 7)  $t_1^*$  - продолжительность работы в минутах при нагрузке  $Q_1$  со смазкой, при которой сила трения сравнивается с нагальной силой трения без смазки;
- 8)  $t_2^*$  - тоже при нагрузке  $Q_2$ ;
- 9)  $t_1^* t_2^*$  - износостойкость пластической смазки на установке УМ-25-ПОРТ в минутах;

### 3.1.2 Модель и функции изменения силы трения в установке;

$$1) \quad F = k_F Q^m t; \quad (3.1)$$

2)  $k_F$  - коэффициент износостойкости изменения силы трения в установке;

### 3.1.3 Степенная аппроксимация функции;

$$1) \quad F(Q, t) = ct^\beta; \quad (3.2)$$

$c, \beta$  - параметры аппроксимации;

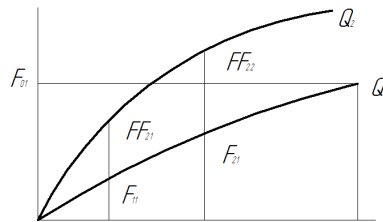


Рис.3.2—Схема выбора базовых точек

3) Функция  $F_1(Q, t) = c_1 t^{\beta_1}$  выбор базовых точек :

$$(F_{11}, t_1) (F_{12}, t_2); \quad (3.4)$$

$$4) (3.4) \Rightarrow (3.3) \Rightarrow F_{11} = c_1 t_1^{\beta_1}; F_{12} = c_1 t_2^{\beta_1}; \quad (3.5)$$

$$5) (3.5) \Rightarrow \frac{F_{11}}{F_{12}} = \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{\beta_1}; \quad (3.6)$$

$$6) (3.6) \Rightarrow \beta_1 = \frac{\lg F_{11}/F_{12}}{\lg t_1/t_2}; \quad (3.7)$$

$$7) (3.5) \Rightarrow C_1 = \frac{F_{11}}{t_1^{\beta_1}}; \quad (3.8)$$

$$8) \text{ Аналогично: } \beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg t_1/t_2}; C_2 = \frac{F_{21}}{t_1^{\beta_2}}; \quad (3.9)$$

### 3.1.4 Определение износостойкости смазки $t^*$ из условия:

$$F(t^*, Q_i) = F_{oi}; \quad (3.4)$$

$$2) \text{ Для } Q = Q_2: F(t_2^*, Q_2) = F_{o2}; \quad (3.5)$$

$$3) \text{ С учетом (3.2) из (3.5) уравнения для } t_2^*: C_2 (t_2^*)^{\beta_2} = F_{o2}; \quad (3.6)$$

$$4) \text{ Решения (3.6) относительно } t_2^*, \text{ имеем: } t_2^* = \left( \frac{F_{o2}}{C_2} \right)^{\frac{1}{\beta_2}} ; \quad (3.7)$$

3.1.5 Сравнение износостойкости пластических смазок возможно 1) качественно (рейтинговые по величине  $t_2^*$ ) и 2) количественное по интенсивности изнашивания, вторая методика сравнения требует дополнительных исследований как определений параметров так и определений условий работы конкретного узла трения.

3) Далее в п.3.2 показать процедуру и некоторые рейтинговые сравнения некоторых смазок.

3.1.6 Условия испытаний для всех смазок одинаковые.

1) Верчение шара со скоростью 150 об / мин .

2) Нагрузка на шар  $Q_1 = 2,2 \text{ кг}$ ,  $Q_2 = 4,5 \text{ кг}$  .

3) Измерение силы трения диаметром на плече  $e \dots$  после испытаний в течение времени  $t$  .

4) Средний путь трения 3 и 5 минут  $S_{cp} = \pi dnt = \pi \cdot 1S \cdot 150 \cdot 5 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}$  .

5) Перед началом испытаний смазка удаляется, поверхность обезжиривается.

6) Измеряется сила трения после работе без смазки в течение 3-5 мин.

7) Наносится тонкий слой испытываемой смазки размазать.

8) Измеряется сила трения со смазкой в начале испытаний.

9) Проводятся испытания, и сила трения измеряется через каждые 5 минут работы.

10) Результаты испытаний заносятся в таблицу вида.

Q <sub>1</sub>			Q <sub>2</sub>		
t	S, мм · 10 <sup>4</sup>	F	t	S, мм · 10 <sup>4</sup>	F
сух			сух		
5	3.5		5	3.5	
10	7.0		10	7.0	
15	10.5		15	10.5	

11) По результатам испытаний строим графики зависимости.  $F_1(Q, S); F_2(Q_2, S)$ ;

3.2.1 *Опыты: Литол-24, рейтинг.*

1) Результаты

Q <sub>1</sub> =2.2кг			Q <sub>2</sub> =4.5кг		
t мин	S, мм · 10 <sup>4</sup>	F кг	t	S, мм · 10 <sup>4</sup>	F
сух		0.46	сух		1.05
5	3.5	0.19	5	3.5	0.35
10	7.0	0.23	10	7.0	0.42
15	10.5	0.28	15	10.5	0.48

2) Базовые точки при нагрузке  $Q_2 = 4,5 \text{ кг}$ ,  $F_{21}(t_1 = 5 \text{ мм}) = 0,35 \text{ кг}$ ;  $F_{22}(t = 15 \text{ мм}) = 0,48 \text{ кг}$  .

3) Параметры  $\beta_2, C_2$  сменной аппроксимации функции:  $F_2(Q_2, t) = C_2 t^{\beta_2}$  ,

Определяются по(3.9)с учетом базовых точек:

$$\beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg t_1/t_2} = \frac{\lg 0,35/0,48}{\lg 5/15} = \frac{0,137}{0,477} = 0,287, C_2 = \frac{F_{21}}{t_1^{\beta_2}} = \frac{0,48}{(15)^{0,287}} = \frac{0,48}{2,1760} = 0,22 ;$$

3.2.1 *Определение величины  $t_2^*$  по (3.7).*

$$t_2^* = \left( \frac{F_{o2}}{C_2} \right)^{\frac{1}{\beta_2}} = \left( \frac{1,05}{0,22} \right)^{\frac{1}{0,287}} = (4,773)^{3,484} = 185 \text{ мм} , (t_2^*)^I = 185 \text{ мм} .$$

литол-24.

3.2.3 *Опыт 21, смазка графитная, рейтинг.*

1) Результаты и базовые точки,

Q <sub>1</sub> =2.2кг			Q <sub>2</sub> =4.5кг		
t мин	S, мм · 10 <sup>4</sup>	F	t	S, мм · 10 <sup>4</sup>	F

5	3.5	0.18	5	3.5	0.47
10	7.0	0.24	10	7.0	0.67
15	10.5	0.33	15	10.5	0.85

2) Параметры  $\beta_2, C_2$  аппроксимации функции:

$$\beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg t_1/t_2} = \frac{\lg 0,47/0,85}{\lg 5/15} = \frac{0,2573}{0,477} = 0,5395, C_2 = \frac{F_{21}}{t_2^{\beta_2}} = \frac{0,47}{5^{0,5325}} = \frac{0,47}{2,356} = 0,199 \approx 0,2.$$

3) Нароботка до паяного износа  $(t_2^*)^{II}$  по формуле (3.7).

$$t_2^* = \left( \frac{F_{02}}{C_2} \right)^{\frac{1}{\beta_2}} = \left( \frac{1,05}{0,2} \right) = (5,25)^{1,854} = 21,64, (t_2^*)^{II} = 21,64 \text{ мин.}$$

Графитная.

Опыт 3А. Смазка Мобил, рейтинг.

Q <sub>1</sub> =2.2кг			Q <sub>2</sub> =4.5кг		
t	S, мм · 10 <sup>4</sup>	F	t	S, мм · 10 <sup>4</sup>	F
5	3.5	0.25	5	3.5	0.32
10	7.0	0.19	10	7.0	0.4
15	10.5	0.13	15	10.5	0.62

2) Параметры  $\beta_2, C_2$ :

$$\beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg t_1/t_2} = \frac{\lg (0,32/0,62)}{\lg 5/15} = \frac{0,287}{0,477} = 0,602, C_2 = \frac{F_{21}}{t_2^{\beta_2}} = \frac{0,32}{5^{0,602}} = \frac{0,32}{2,635} = 0,122,$$

3) Нароботка  $(t_2^*)$  до полного износа смазки мобил в заданных условиях по (3.7).

$$(t_2^*)^{II} = \left( \frac{F_{02}}{C_2} \right)^{\frac{1}{\beta_2}} = \left( \frac{1,05}{0,122} \right)^{\frac{1}{0,602}} = (8,606)^{1,66} = 35,63, (t_2^*)^{III} = 35,63 \text{ мин};$$

Мобил.

Опыт 4А. Смазка Castrol, рейтинг.

Q <sub>1</sub> =2.2кг			Q <sub>2</sub> =4.5кг		
t	S, мм · 10 <sup>4</sup>	F	t	S, мм · 10 <sup>4</sup>	F
5	3.5	0.21	5	3.5	0.34
10	7.0	0.26	10	7.0	0.39
15	10.5	0.32	15	10.5	0.45

2) Параметры  $\beta_2, C_2$ :

$$\beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg t_1/t_2} = \frac{\lg 0,34/0,45}{\lg 5/15} = \frac{0,1217}{0,477} = 0,255, C_2 = \frac{F_{21}}{t_2^{\beta_2}} = \frac{0,34}{5^{0,255}} = \frac{0,34}{1,587} = 0,214;$$

3) наработка  $(t_2^*)$ :  $(t_2^*) = \left( \frac{F_{02}}{C_2} \right)^{\frac{1}{\beta_2}} = \left( \frac{1,05}{0,214} \right)^{\frac{1}{0,255}} = (4,906)^{3,92} = 496, t_2^* = 496;$

#### Сводная таблица наработки на предельный износ

номер	смазка	$t_2^*$ минуты	$t_2^*$ часы
1	Литол-24	185	3.08
2	графитная	21.64	0.36
3	мобил	35.63	0.59
4	Castrol	496	8.27

**Вывод по разделу 3:**

1. Предложен метод, ранжировано пластических смазок по продолжительности работ до полного износа.
  2. Из трех испытанных смазок наибольший ресурс у смазки Castrol.
- Соответственно ресурс: Castrol -8.27, Литол-24 -3.08, Мобил-0.59, Графитная-0.36, Т.е. Castrol в три раза более износостойкий, чем Литол-24.

#### 4. Использование модели изнашивания смазки, для оценки ее сравнительной износостойкости.

##### 4.1 Мера измерения толщины смазки и модель.

- 1) Брать в качестве меры износа смазки изменение ее толщину  $\Delta h$  затруднительно чисто по техническим причинам;
- 2) В связи с этим в качестве меры изменения толщины при испытаниях будем брать изменение сил трения  $\Delta F$  и связанную с этим величину безразмерного износа толщину масляной пленки  $\overline{h}_w$

$$\overline{h}_w = \frac{\Delta h}{h_0} = k \Delta F ; \quad (4.1)$$

- 3) Величина  $\overline{h}_w$  меняется в пределах:  $0 < \overline{h}_w < 1$ ,  $\overline{h}_w(S=0) = 0$ ;  $\overline{h}_w(S=S^*) = 1$ ;

в дальнейшем черточку для краткости будем опускать.

- 4) По результатам испытаний смазки на износ определяются параметры модели изнашивания в дифференциальной форме.

$$\frac{du_w}{ds} = k w_h \sigma^m ; \quad (4.2)$$

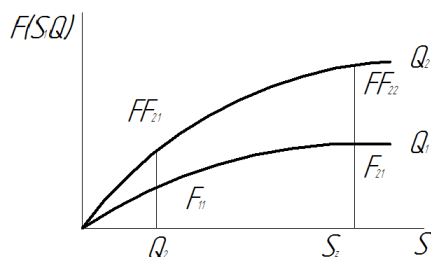
или при давлении, не зависящем от кута S :

$$h_w = k_w \sigma^m S^p , \quad (4.3)$$

где  $\sigma = \frac{Q}{\pi a^2}$  ;

##### 4.2 Схема испытаний для определения параметров $k_w, m$ модели изнашивания смазки.

- 1) Схема испытаний  $\overline{h}_w = kF$  :



- 2) В трехпараметрической  $k_w, m, \beta$  модели:

$$\overline{h}_w = F(S, \sigma) = k_w \sigma^m S^\beta ; \quad (4.4)$$

в схеме испытаний необходимо минимум три состояния для составления трех уравнений.

- 3) Испытания проводятся при двух нагрузках  $Q_1, Q_2$ .

##### 4.3 Вывод основных соотношений для определенных параметров $k_w, m, \beta$ .

- 4.3.1 Параметры  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , запишем (4.4) для нагрузок  $Q_1$  и  $Q_2$  :

$$F_1 = k_{w1} \sigma_1^{m_1} S_1^{\beta_1} , \quad (4.5)$$

$$F_2 = k_{w2} \sigma_2^{m_2} S_2^{\beta_2} ; \quad (4.6)$$

- 1) Для определения параметров  $\beta_1, \beta_2$  на каждой функции  $F_1$  и  $F_2$  выбираем по две базовые точки .

$$\left. \begin{array}{l} S_1, F_{11}; S_2, F_{12} \\ S_1, F_{21}; S_2, F_{22} \end{array} \right\} \quad (4.7)$$

- 2) (4.7)  $\rightarrow$  (4.5), (4.6)  $\Rightarrow$  ;

$$F_{11} = k_{w1} \sigma_1^{m_1} S_1^{\beta_1} ; F_{12} = k_{w1} \sigma_1^{m_1} S_2^{\beta_1} , \quad (4.8)$$

$$F_{21} = k_{w_2} \sigma_2^{m_2} S_1^{\beta_2}; F_{22} = k_{w_2} \sigma_2^{m_2} S_2^{\beta_2}; \quad (4.9)$$

3) Взяв отношение уравнений (4.8), имеем :

$$\beta_1 = \frac{\log F_{11}/F_{22}}{\lg S_1 S_2}; \quad (4.10)$$

аналогично из уравнений (4.9) имеем :

$$\beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg S_1 S_2}; \quad (4.11)$$

4) Если параметры  $\beta_1 \neq \beta_2$  не равны друг другу, определяем среднее значение:

$$\beta = \beta_{cp} = \frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_2); \quad (4.12)$$

4.3.2 Допущение: будем в дальнейшем полагать что коэффициент  $k_{w_1}, k_{w_2}$  антексивности износа смазки при давлении  $\sigma_1$ , и  $\sigma_2$  одинаковы  $k_{w_1} = k_{w_2} = k_w$  и параметра  $m_1 = m_2 = m$

1) С учетом (4.12) и допущения уравнений (4.5), (4.6) принимают вид :

$$F_1 = k_w \sigma_1^m S^{\beta}; F_2 = k_w \sigma_2^m S^{\beta}; \quad (4.13)$$

2) Записав (4.13) для точек  $F_{12}(\sigma_1, S_2); F_{22}(\sigma_2, S_2)$  имеем:

$$F_{12} = k_w \sigma_1^m S_2^{\beta}; F_{22} = k_w \sigma_2^m S_2^{\beta}; \quad (4.14)$$

3) Из отношения уравнений имеем:

$$m = \frac{\lg F_{12}/F_{22}}{\lg \sigma_1/\sigma_2}; \quad (4.15)$$

4.4 Определение параметров  $k_w$ .

Из любого уравнения (4.14) можно найти параметр  $k_w$ ; например из первого (4.14) уравнения при известных  $m$  и  $\beta$ .

$$k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^{\beta}}; \quad (4.16)$$

4.4.1 Сравнение износа разных смазок в одинаковых и разных условиях.

1) Пусть для двух смазок I и II известных параметров:

$$k_w^I, m^I, \beta^I; k_w^{II}, m^{II}, \beta^{II};$$

2) Запишем уравнения моделей (4.4) для этих смазок:

$$h_w^I = k_w^I \sigma^{m^I} S^{\beta^I}; k_w^{II} = k_w^{II} \sigma^{m^{II}} S^{\beta^{II}}; \quad (4.17)$$

3) Взяв отношение уравнений (4.17), получаем отношение износа смазок при одинаковых давлениях.

$$\sum_{I, II} \frac{h_w^I}{h_w^{II}} = \frac{k_w^I}{k_w^{II}} \sigma^{m^I - m^{II}}; \quad (4.18)$$

4.5 Определение износа смазки в разных узлах трения.

1) В разных узлах трения условия работы давления  $\sigma$  и путь трения могут быть разными.

2) Если из эксперимента найдены все  $k_w, m, \beta$  параметры модели трения для заданной смазки, то определение величин  $h_w$  относительного износа смазки определяется в зависимости (модели) (4.4).

$$\bar{h}_w = k_w \sigma^m S^{\beta}; \quad (4.19)$$

3) Для выполнения расчетов необходимо найти : 1) давление  $\sigma$  в контакте из решения соответствующей контактной задачи, 2) путь трения в контакте на заданном времени работы.

Примера определения параметров модели и определения относительного износа смазки приведена далее в пункте 5.

## 5. Определения параметров трехфакторной модели и расчет износа ГС узлов трения.

5.1 Общая схема, методика и основные соотношения метода.

1) Модель изнашивания ГС по (4.3).

$$h_w = k_w \sigma^m S^\beta ; \quad (5.1)$$

$$\beta_1 = \frac{\lg F_{11}/F_{12}}{\lg S_1/S_2}; \beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg S_1/S_2}; \quad (5.2)$$

$$\beta = \frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_2); \quad (5.3)$$

$$m = \frac{\lg F_{12}/F_{22}}{\lg \sigma_1/\sigma_2}; \quad (5.4)$$

$$k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^\beta}, \sigma_1 = \frac{Q}{\pi d^2}; \quad (5.5)$$

$$\varepsilon^{I/II} = \frac{h^I}{h^{II}} = \frac{k_w^I}{k_w^{II}} \sigma^{m^I - m^{II}}; \quad (5.6)$$

### 5.2 Опыты.

Условия и методика испытаний описаны в пункте 3.1

Опыт 1В, Литол-24, параметры.

1) Результаты испытаний приведены в таблице 3.1, базовые точки функции  $F_1(S), F_2(S)$ :

$$F_{11} = 0,19 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_0 = 1,05 \text{ кГ}; F_{12} = 0,28 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; Q_1 = 2,2 \text{ кГ};$$

$$F_{21} = 0,35 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; Q_2 = 4,5 \text{ кГ}; F_{22} = 0,48 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

2) По (5.2):

$$\beta_1 = \frac{\lg F_{11}/F_{12}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,19/0,28}{\lg 3,5/10,5} = \frac{0,1684}{0,477} = 0,353; \beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,35/0,48}{\lg 3,5/10,5} = \frac{0,137}{0,477} = 0,287$$

$$\beta = \frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_2) = \frac{1}{2}(0,353 + 0,287) = 0,32$$

3) По (5.4):

$$m = \frac{\lg F_{12}/F_{22}}{\lg Q_1/Q_2} = \frac{\lg 2,8/0,48}{\lg 2,2/4,5} = \frac{0,234}{0,31} = 0,755;$$

4) По (5.5):

$$k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^\beta} = \frac{0,28}{77 \cdot (10,5 \cdot 10^4)^{0,32}} = \frac{0,28}{0,058 \cdot (10,5 \cdot 10^4)^{0,32}};$$

$$\sigma = \frac{4,5}{(\pi \cdot 10^2)^{0,755}} = \frac{4,5}{(\pi \cdot 100)^{0,755}} = \frac{4,5}{77} = 0,058;$$

$$a = 10; d = 2a$$

$$k_w = \frac{0,28}{0,058 \cdot (10,5 \cdot 10^4)^{0,32}} = \frac{0,28}{0,058 \cdot 40} = 0,12; \quad k_w = 0,12.$$

### 5.3 Опыт 2В. Графитная смазка.

1) Базовые точки функции  $F_1(S), F_2(S)$ :

$$F_{11} = 0,18 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_{12} = 0,33 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

$$F_{21} = 0,47 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_{22} = 0,85 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

2) По (5.2):

$$\beta_1 = \frac{\lg F_{11}/F_{12}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,18/0,33}{\lg 3,5/10,5} = \frac{0,263}{0,477} = 0,551; \beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,47/0,85}{0,477} = \frac{0,137}{0,477} = 0,5338$$

$$\beta = \beta_{cp} \frac{1}{2}(0,5551 + 0,5338) = 0,544; \beta = 0,544$$

$$3) \text{ По (5.4): } m = \frac{\lg F_{12}/F_{22}}{\lg Q_1/Q_2} = \frac{\lg 3,3/0,85}{\lg 2,2/4,5} = 1,325; m = 1,325;$$

$$4) \text{ По (5.5): } k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^\beta} = \frac{0,33}{0,058^{1,325} (10,5 \cdot 10^4)^{0,544}} = 2,662; k_w = 2,662;$$

#### 5.4 Опыт 3В. Смазка Мобил.

1) Базовые точки:

$$F_{11} = 0,25 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_0 = 1,05; F_{12} = 0,3 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

$$F_{21} = 0,32 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_{22} = 0,62 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

2) По (5.3):

$$\beta_1 = \frac{\lg F_{11}/F_{12}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,25/0,3}{0,477} = \frac{0,079}{0,477} = 0,166; \beta_2 = \frac{\lg 0,32/0,62}{0,477} = \frac{0,2872}{0,477} = 0,602;$$

$$\beta = \frac{1}{2}(0,166 + 0,602) = 0,38$$

$$3) \text{ По (5.4): } m = \frac{\lg F_{12}/F_{22}}{\lg Q_1/Q_2} = \frac{\lg 0,3/0,62}{\lg 2,2/4,5} = \frac{0,315}{0,31} 1,02; m = 1,02;$$

$$4) \text{ По (5.5): } k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^\beta} = \frac{0,33}{(0,058)^{1,02} (10,5 \cdot 10^4)^{0,384}}; k_w = \frac{0,33}{0,055 \cdot 85} = 0,705; k_w = 0,705;$$

#### 5.5 Опыт 4В. Смазка Castrol.

1) Базовые точки:

$$F_{11} = 0,06 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_{12} = 0,09 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

$$F_{21} = 0,13 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_{22} = 0,18 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

$$2) \beta_1 = \frac{\lg 0,06/0,09}{\lg 3,5/10,5} = \frac{0,25}{0,477} = 0,524;$$

$$3) \beta_2 = \frac{\lg 0,13/0,18}{0,477} = \frac{0,141}{0,477} = 0,296;$$

$$4) \beta = \frac{1}{2}(0,524 + 0,296) = 0,41; \beta = 0,41;$$

$$5) m = \frac{\lg 0,09/0,18}{\lg 2,2/4,5} = \frac{0,301}{0,31} = 0,97 \approx 1;$$

$$6) k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^\beta} = \frac{0,09}{(0,058)^1 (10,5 \cdot 10^4)^{0,41}}; k_w = \frac{0,09}{0,058 \cdot 114,5} = 0,0135; k_w = 0,0135;$$

Таблица 4

**Итоговая таблица результатов испытаний смазок**

№ опыта	Смазка	$\beta$	$m$	$k_w$	$\varepsilon = \frac{h}{h^I}$
1	Литол-24	0,32	0,755	0,12	1
2	графитная	0,544	1,325	2,662	22,0
3	Мобил	0,384	1,02	0,705	5,87
4	Castrol	0,97	0,97	0,0135	0,11

#### Литература

1. Кузьменко А.Г. Новые методы и результаты исследований (адгизионно-деформационны) теории трения (АДД часть 2) II Проблемы трибологии-2012. -№2 – с 13-32.

2. Кузьменко А.Г. Метод и результаты испытаний на износ пластических смазок в реверсивном режиме.

Надійшла в редакцію 04.12.2014

**Kuzmenko A.G. Methods and results of tests of border layer of the plastic greasings**

Methods and results of tests of border layer of the plastic greasings are in-process considered on a wear

**Key words:** border layer, plastic greasings, wear, methods of calculation**References**

1. Kuzmenko A.G. Novyie metody i rezultaty issledovaniy (adgizionno-deformatsionny) teo-rii treniya (ADD chast 2) II Problemy tribologii-2012. N2 . p 13-32.
2. Kuzmenko A.G. Metod i rezultaty ispytaniy na iznos plasticheskikh smazok v reversivnom rezhime.