

УДК 620.178.16.004

ИЗНОС МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ СОПРЯЖЕНИЯ ТИПА ВАЛ- ВТУЛКА ПРОДОЛЬНОГО ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СРЕДЕ БИОТОПЛИВА

Журавель Д.П., к.т.н.,

Юдовинский В.Б., к.т.н.

Таврический государственный агротехнологический университет

Тел. (0619) 42-13-54

Аннотация – работа посвящена установлению аналитической зависимости коэффициента износа материалов деталей сопряжения типа вал-втулка продольного относительного перемещения в среде биотоплива.

Ключевые слова – коэффициент износа, интенсивность изнашивания, угол контакта, суммарный износ.

Постановка проблемы. Прогнозирование ресурса работы узлов и агрегатов мобильной техники возможно при наличии обобщенного показателя поведения материалов деталей сопряжения, то есть коэффициента износа. Коэффициент износа K_U – это характеристика свойств материалов деталей сопряжений и условий изнашивания, который зависит от распределения давлений по поверхности контакта элементов сопряжения, пути трения и конструктивной формы сопряжения, определяющей его принадлежность к тому или иному типу согласно классификации по условиям трения и износа[3].

Анализ последних исследований. Вопросам износа материалов различных сопряжений посвящено много работ [1-7]. Однако они носят, в основном, экспериментальный характер, что затрудняет их использование при прогнозировании ресурса.

Формулирование цели статьи. Целью статьи является установление аналитической зависимости определения коэффициента износа материалов деталей сопряжения типа вал-втулка продольного относительного перемещения в среде биотоплива.

Основная часть. Сопряжение типа вал-втулка продольного перемещения относится к четвертой группе классификации [1]. В этом случае имеет место неравномерный износ поверхности втулки и вала в продольном сечении.

Износ деталей сопряжения связан с условиями работы. Так при радиальном нагружении втулки или вала износ втулки будет односторонний и зависит от геометрических параметров втулки и вала, а также от условий нагружения.

Форма изношенной поверхности втулки $U(\alpha)$ является результатом неравномерного распределения работы трения по длине дуги контакта втулки.

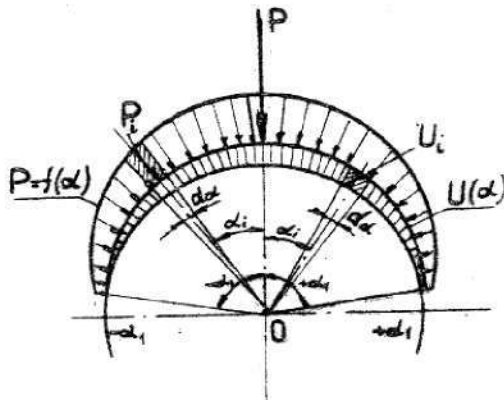


Рис.1. Расчетная схема сопряжения типа вал-втулка в радиальном сечении.

Если приравнять количество затраченной работы трения A_1 и работы A_2 , необходимо для образования износа, ограниченного кривой $U(\alpha)$, где A_1 -работа трения, возникающая в сопряжении вал-втулка при их относительном перемещении (вращении) и действия давления, а A_2 – работа, затрачиваемая на износ втулки под действием сил трения, то получим равенство, из которого можно определить коэффициент износа.

Элементарная затраченная работа трения dA_1 при относительном перемещении деталей сопряжения является произведением коэффициента трения, пути трения и функции распределения давления

$$dA_1 = \mu \cdot R \cdot \varphi \left[f(\alpha) R_1 \cdot \frac{\cos \alpha}{d} \cdot d\alpha \right], \quad (1)$$

где μ - коэффициент трения;

R_1 - радиус шипа вала;

φ - угол поворота шипа (вала);

$f(\alpha)$ -функция распределения нормальных давлений;

α - половина угла контакта.

Вся работа трения при относительном перемещении деталей сопряжения выражается зависимостью

$$A_1 = \frac{\mu}{a} \cdot R_1^2 \cdot \varphi \int_{-\alpha_1}^{+\alpha} f(\alpha) \cdot \cos d_\alpha = \frac{\mu \cdot R_1^2 \cdot \varphi \cdot P}{a}, \quad (2)$$

где P - реакция во втулке;
 a - ширина втулки.

$$P = \int_{-\alpha_1}^{+\alpha_1} f(\alpha) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \quad (3)$$

элементарная работа трения dA_2 , затраченная на износ по дуге контакта α_i , будет

$$dA_2 = \frac{\mu \cdot a \cdot U_i(\alpha) d\alpha}{K_U(\alpha)} = \frac{\mu \cdot a \cdot U_i \cdot (U_i + R_2) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha}{K_U(\alpha)}. \quad (4)$$

Здесь $\left[\frac{K_U(\alpha)}{\mu} \right]$ показывает, на сколько микрометров изнашивается

данный элемент поверхности при затрате единицы работы трения.

Интегрируя последнее выражение и принимая, что коэффициент износостойкости не является постоянным по всей дуге контакта из непостоянства условий трения, получим значение работы A_2

$$A_2 = \mu \cdot a \int_{-\alpha_1}^{+\alpha_1} \frac{U_i(\alpha)}{K_U(\alpha)} \cdot d\alpha = \mu \cdot a \int_{-\alpha_1}^{+\alpha_1} \frac{U_i(U_i + R_2) \cos \alpha \cdot d\alpha}{K_U(\alpha)}, \quad (5)$$

где $F_U = \int U_i(U_i + R_2) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha = U_2(U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha$ - площадь, заключенная между первоначальным внутренним контуром втулки и контуром ее после износа.

Для максимального значения износа втулки $U_1 = U_2$.

Тогда элементарная площадь, заключенная между первоначальным контуром втулки и контуром ее после износа (площадь поперечного сечения износа), определяется зависимостью

$$dF_U = U_2(U_2 + R_2) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha. \quad (6)$$

Проинтегрируем это выражение и получим полную площадь поперечного сечения износа

$$dF_U = U_2 (U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

Подставив это значение в уравнение работы, получим

$$A_2 = \frac{\mu \cdot a \cdot U_2 (U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha}{K_U(\alpha)}. \quad (8)$$

Приравняв равенство работ, получим коэффициент износа материалов деталей сопряжения вал-втулка, как функцию угла контакта:

$$\frac{\mu \cdot R_1^2 \cdot \varphi \cdot P}{a} = \frac{\mu \cdot a \cdot U_2 (U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha}{K_U(\alpha)}. \quad (9)$$

$$K_U(\alpha) = \frac{4a^2 \cdot U_2 (U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha}{D_1 \cdot S \cdot P} \cdot \frac{\text{мкм}}{\text{Па} \cdot \text{км}}. \quad (10)$$

Коэффициент износа материалов деталей сопряжения типа вал – втулка показывает, на сколько микрометров изнашивается втулка радиусом R_2 при контакте с валом диаметром D_1 на пути трения S и давлении P .

Износ вала происходит за счет перемещения втулки по валу.

Рассмотрим форму продольного сечения износа вала в радиальном сечении в плоскости максимального нагружения в зависимости от их конструктивных особенностей и законов кривых распределения длины хода втулки.

В зависимости от закона распределения длин ходов втулки все виды подобных сопряжений можно разделить на две группы:

- сопряжения с нормальным законом распределения длины хода втулки;
- сопряжения с логарифмически нормальным распределением длины хода втулки;

Для **первой группы**, принимая, что кривая распределения ходов $\varphi(x)$ подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием приложения реакции на втулке $a_i = l_p$ закон вероятности выражается зависимостью

$$\varphi(X) = Mi(X) = \frac{M_i}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[- \frac{(X - a_i)^2}{2\sigma_L^2} \right], \quad (11)$$

де a_i – координата центра группировки ходов втулки;
 σ_L – среднеквадратическое отклонение;
 M_i – нормирующий множитель, выбираемый условия равенства единице всей площади под кривой распределения в заданной области значения, определяемой с помощью значений функции Лапласа

$$M = \frac{1}{\Phi\left(\frac{a_i}{\sigma_L}\right) + \Phi\left(\frac{L - a_i}{\sigma_L}\right)}. \quad (12)$$

Принимая, что продольное сечение износа втулки является зеркальным отражением площади, ограниченной кривой распределения ходов, растянутой в m раз, то есть на отношение $\left[\frac{L_k}{L} = m\right]$ полной длины изнашивания вала на длину распределения ходов втулки (рис.1.), получим

$$F_U = m \int_0^L \varphi(x) dx. \quad (13)$$

Тогда, подставив в это выражение значение функции $\varphi(x)$, получим площадь максимального сечения износа вала

$$F_U = \frac{M_i m}{\sigma_L \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int \exp\left[-\frac{(x - a_i)^2}{2\sigma_L^2}\right] \cdot dx \quad (14)$$

Или через функцию Лапласа

$$F_U = \frac{M_i \cdot m}{2} \cdot \left\{ \Phi_0\left[\frac{L - a_i}{\sigma_L}\right] - \Phi_0\left[\frac{a_i}{\sigma_L}\right] \right\} \quad (15)$$

Максимальная величина износа вала U_{\max} , как ордината наиболее вероятной величины зеркального отражения максимальной ординаты кривой распределения длины втулки (рис.2.) может быть выражена уравнением

$$U_{\max} = \frac{M_{i-m}}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \quad (16)$$

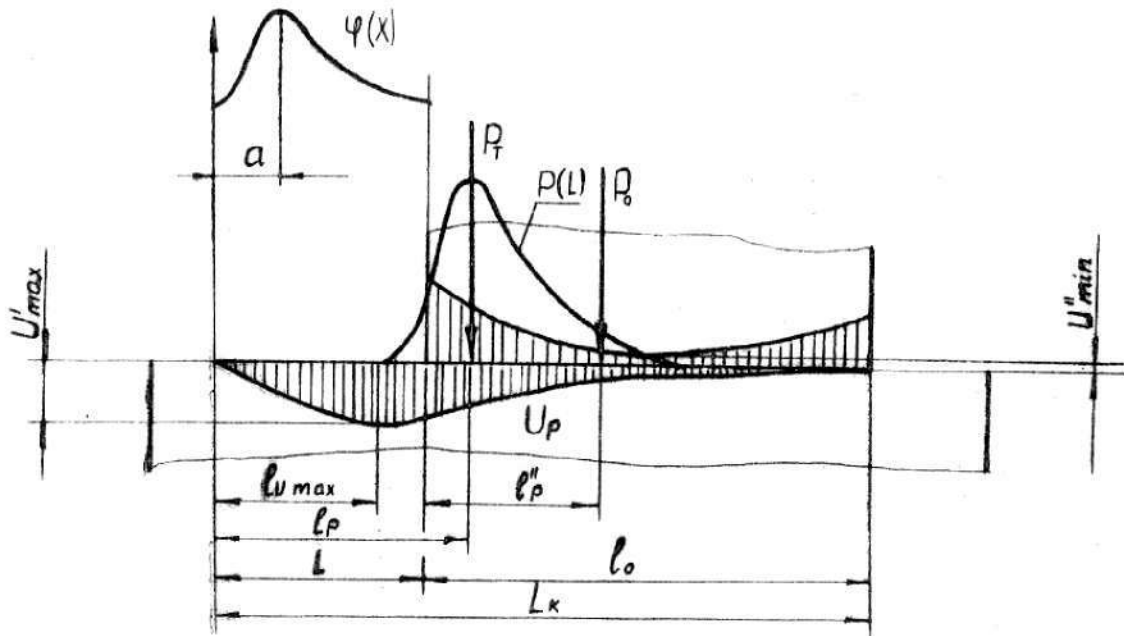


Рис. 2. Вероятность приложения реакции нагружения P_T вала и эпюры износов вала и втулки от распределения длины ходов втулки.

Подставив значение U_{\max} в выражение F_U получим

$$F_U = U_{\max} \cdot \sigma_L \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ \Phi_0 \left[\frac{L - a_i}{\sigma_L} \right] - \Phi \left[\frac{a_i}{\sigma_L} \right] \right\}, \quad (17)$$

Принимая критические значения деформаций абразивным зерном поверхности изнашиваемого металла [2] при наличии загрязненности среды и учитывая, что коэффициент износа материалов, выведенный А.С.Прониковым [1] описывается зависимостью

$$K_U = \frac{F_U \cdot b}{S \cdot P}, \frac{\text{мкм}}{\text{Па} \cdot \text{км}}, \quad (18)$$

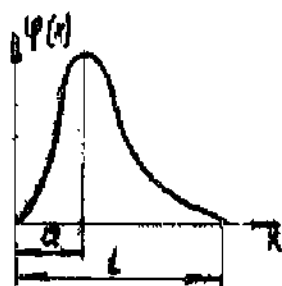
где F_U - площадь максимально продольного износа вала, мкм · м;
 b - ширина втулки, м;
 S - путь трения, км;
 P - удельное давление, Па.

Тогда можно получить уравнение для определения коэффициента износа материалов вала с учетом законов распределения ходов втулки

$$K_U = \frac{0,42 \cdot \sigma_L \cdot \cos \frac{\Theta}{2}}{L_K \cdot (HB)} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ \Phi_0 \left[\frac{L - a_i}{\sigma_L} \right] - \Phi \left[\frac{a_i}{\sigma_L} \right] \right\}, \quad \frac{\text{мкм}}{\text{Па} \cdot \text{км}} \quad (19)$$

Таким образом, коэффициент износа материалов вала при нормальном законе распределения длины ходов втулки является функцией свойств материала, характеристики абразива среды, конструктивных параметров ($L_K = L + l_0$) и функции распределения ходов втулки.

Для второй группы, распределение длин ходов втулки аппроксимируется логарифмически нормальным законом распределения. Плотность распределения ходов втулки можно записать в виде

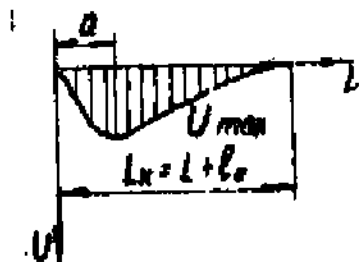


$$\varphi(x) = M \cdot \varphi_0(x) = \frac{M}{x \sigma_L \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(\ln x - a)^2}{2\sigma_L^2} \right], \quad (20)$$

где нормирующий множитель «M» можно определить с помощью значений функции Лапласа

$$M = \frac{1}{\Phi_0 \left(\frac{a}{\sigma_L} \right) + \Phi \left(\frac{\ln - a}{\sigma_L} \right)}. \quad (21)$$

Принимая, что площадь продольного сечения износа вала является зеркальным отражением площади, ограниченной кривой распределения ходов втулки, увеличенной в m раз, где



$m = \frac{L_K}{L} = \frac{L + l_0}{L}$ - отношение длины изнашивания направляющей на максимальную величину перемещения (Рис.2), можно записать

сать

$$F_{U1} = m \int_0^L \varphi(x) = M \cdot m \int_0^L \varphi_0(x). \quad (22)$$

Подставив в это уравнение значение функции $\varphi_0(x)$, получим

$$F_{U1} = \frac{M \cdot m}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^L \exp\left[-\frac{(\ln L - a)^2}{2\sigma_L^2}\right] \cdot dx \quad (23)$$

После интегрирования получим площадь продольного сечения максимального износа вала, выраженную через функции Лапласа

$$F_{U1} = \frac{M \cdot m}{2} \left\{ \Phi_0\left[\frac{\ln L - a}{\sigma_L}\right] - \Phi_0\left[\frac{1 - a}{\sigma_L}\right] \right\}. \quad (24)$$

Величина максимального износа U_{\max} определяется частным случаем, когда $L=a$ в функции $\varphi_0(x)$

$$U_{\max} = \frac{M \cdot m}{L \cdot \sigma_L \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln a - a)^2}{2\sigma_L^2}\right]. \quad (25)$$

Подставив значение максимального износа U_{\max} в формулу площади сечения F_{U1} , получим

$$F_{U1} = U_{\max} \cdot \frac{L \cdot \sigma_L}{\exp\left[-\frac{(\ln a - a)^2}{2\sigma_L^2}\right]} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2} \left\{ \Phi_0\left[\frac{\ln L - a}{\sigma_L}\right] - \Phi_0\left[\frac{1 - a}{\sigma_L}\right] \right\}}. \quad (26)$$

Зная уравнение площади сечения износа по приведенным выше формулам аналитического определения максимального износа и зависимости А.С. Проникова, коэффициент износа материалов вала определяется выражением

$$K_U = \frac{0,42L\sigma_L \cos \frac{\Theta}{2}}{L_K(HB) \cdot \exp\left[-\frac{(\ln a - a)^2}{2\sigma_L}\right]} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \Phi_0\left[\frac{\ln L - a}{\sigma_D}\right] - \Phi_0\left[\frac{1 - \phi}{\sigma_D}\right] \right\} \quad (27)$$

Применение биотоплива в контакте изнашиваемых деталей сопряжений, снижают численное значение коэффициента износа на 10-13 % по отношению к среде нефтяного топлива.

Большое значение на величину износов деталей сопряжения, работающих в среде биотоплива, оказывает время простоя. Это объясняется воздействием метанолов биотоплива в статическом состоянии. Зависимость приращения износа от времени простоя сопряжения представлены на рис.3.

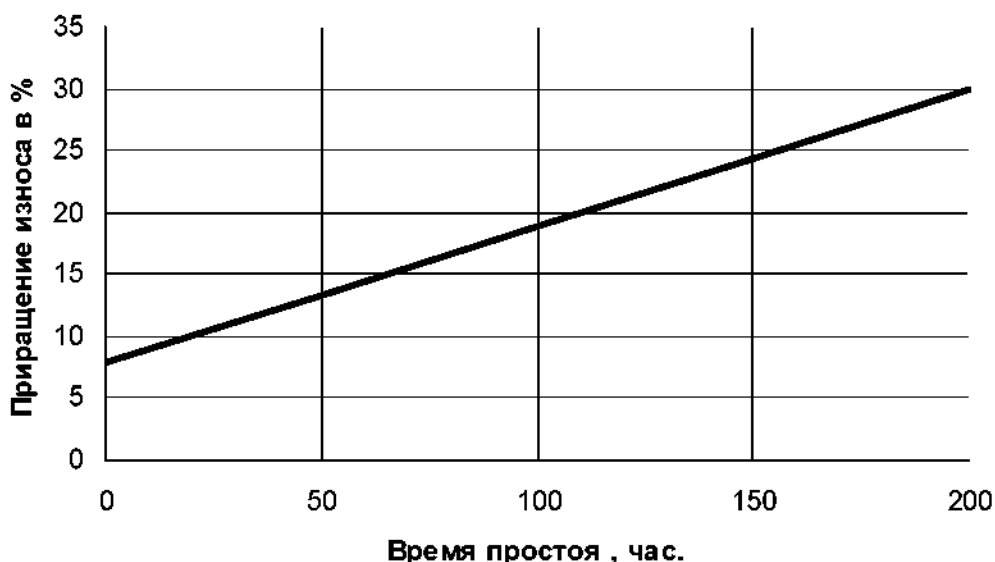


Рис.3. Влияние времени простоя на приращение износа в процентах.

Таким образом, наличие биотоплива в зоне изнашивания деталей сопряжений при наличии простоев, приводит к общему увеличению изнашивания деталей сопряжений и повышению численных значений коэффициентов износа.

Зависимость примет вид:

- для сопряжения с нормальным законом распределения длины ходов втулки;

$$K_U = \frac{0,42 \cdot \sigma_L \cdot \cos \frac{\Theta}{2} \cdot \left(1 + \frac{\beta}{100}\right)}{L_K \cdot (HB)} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ \Phi_0 \left[\frac{L - a_i}{\sigma_L} \right] - \Phi \left[\frac{a_i}{\sigma_L} \right] \right\}, \quad (28)$$

- для распределение длин ходов втулки с логарифмически нормальным законом распределения.

$$K_U = \frac{0,42 L \sigma_L \cos \frac{\Theta}{2} \cdot \left(1 + \frac{\beta}{100}\right)}{L_K (HB) \cdot \exp \left[-\frac{(\ln a - a)^2}{2\sigma_L} \right]} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \Phi_0 \left[\frac{\ln L - a}{\sigma_D} \right] - \Phi_0 \left[\frac{1 - \phi}{\sigma_D} \right] \right\}, \quad (29)$$

где β – процент приращения коэффициента износа за счет простоев.

Выводы. 1. Полученные зависимости коэффициентов износа позволяют учитывать силовые, скоростные параметры работы деталей сопряжений типа вал-втулка, а также влияние абразивности загрязнений и влияние метанолов биотоплива в процессе работы.

2. Не смотря на уменьшение изнашивания материалов в среде биотоплива общий износ деталей сопряжений при наличии простоев, приводит к общему увеличению изнашивания деталей сопряжений и повышению численных значений коэффициентов износа.

3. Предложенные коэффициенты износа упрощают общую методику прогнозирования ресурса сопряжений тапа вал-втулка относительного перемещения.

Литература

1. Журавель Д.П. Прогнозування ресурсу трибоспрязень мобільних сільськогосподарських агрегатів / Д.П. Журавель, В.Б.Юдовінський, С.В.Кюрчев // Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ, 2008. - Вип. 75. – С. 11-22.

2. Журавель Д.П. Моделювання хімотологічних та триботехнічних процесів в спряженнях тертя / Д.П. Журавель, В.Б. Юдовінський // Праці ТДАТА. – Мелітополь, 2007. – Вип. 7. т 3. – С. 30-38.

3. Юдовинский В.Б. Обоснование комплексного показателя износостойкости материалов / В.Б. Юдовинский, Д.П. Журавель, К.Г. Петренко // Научные труды ТДАТА. - Мелитополь, 2006. - Вып.42. - С.15-20.

4. *Костецкий Б.И.* Трение, смазка и износ в машинах / *Б.И. Костецкий* . – К : Техніка, 1970.- 396 с.

5. *Юдовинський В.Б.* Дослідження процесу зношування основних сполучень деталей сільськогосподарської техніки через коефіцієнт зносу / *В.Б. Юдовинский, Д.П. Журавель, О.Д. Савченко* // Праці ТДАТА. – Мелітополь, 2003. – Вип. 15. - С. 24-29.

6. *Юдовинський В.Б.* Еквівалентні коефіцієнти зносу і критерії припрацювання деталей сполучень сільськогосподарської техніки / *В.Б. Юдовинский, Д.П. Журавель* // Праці ТДАТА. – Мелітополь, 2003. - Вип.15. - С.29-33.

7. *Юдовинський В.Б.* Теория разрушения поверхностных слоев металла при трении / *В.Б. Юдовинский, Д.П. Журавель* // Праці ТДАТА. – Мелітополь, 2005. - Вип.33. - С.103-106.

ЗНОС МАТЕРІАЛІВ ДЕТАЛЕЙ СПРЯЖЕНЬ ТИПУ ВАЛ - ВТУЛКА ПОВЗДОВЖНЬОГО ВІДНОСНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ БІОПАЛИВА

Журавель Д.П., Юдовинський В.Б.

Анотація - робота присвячена встановленню аналітичної залежності коефіцієнту зносу матеріалів деталей спряжень типу вал-втулка повздовжнього відносного переміщення в середовищі біопалива.

DETERIORATION OF MATERIALS OF DETAILS OF INTERFACES OF TYPE SHAFT - THE PLUG LONGITUDINAL RELATIVE MOVING IN THE ENVIRONMENT OF BIOFUEL

D. Juravel, V. Yudovynskyu

Summary

Work is devoted to establishment of analytical dependence of factor of deterioration of materials of details of interfaces of type a shaft-plug of longitudinal relative moving in the environment of biofuel.