

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ
ПРЕЦИЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ ДВС,
РАБОТАЮЩИХ В СРЕДЕ БИОТОПЛИВА**

Дидур В.А., д.т.н., Журавель Д.П., к.т.н., Юдовинский В.Б., к.т.н.,

Коломоец В.А., инженер

Таврический государственный агротехнологический университет

Ключевые слова – топливная аппаратура, плунжер, гильза, износ плунжерных пар, коэффициент износа материалов, ресурс деталей сопряжения, потеря мощности двигателя, биотопливо..

Аннотация – работа посвящена моделированию процесса изнашивания плунжерных пар топливных насосов ДВС, работающих в среде биотоплива.

Постановка проблемы. Эксплуатационные характеристики дизельных двигателей во многом зависят от надежности топливной аппаратуры, в частности от сопряжения плунжер – гильза. Даже незначительный износ элементов плунжера и гильзы, резко сказывается на давлении впрыска и объеме топлива, подаваемого в цилиндр. Это приводит к снижению мощности двигателя и тяговых характеристик трактора. Интенсивность изнашивания, в свою очередь, зависит от свойств материалов деталей сопряжения, силовой характеристики работы сопряжения и от активности свойств топлива.

Формулирование целей статьи. Целью статьи является разработка метода прогнозирования ресурса прецизионных соединений топливных систем ДВС, на примере плунжерных пар насосов высокого давления.

Основная часть. Плунжерный насос представляет собой сопряжение типа вал-втулка продольного перемещения с постоянной величиной хода вала.

Износ деталей сопряжения плунжер – гильза происходит за счет трения плунжера по корпусу из - за больших скоростей движения топлива в период перекрытия плунжером отверстий. Прецизионные детали, вблизи которых топливо движется с большой скоростью, изнашиваются быстрее.

Быстрее всего изнашивается поверхность плунжера вблизи верхней его кромки, обращенная при работе к впускному окну корпуса, и поверхность, прилегающая к отсечной кромке со стороны отсечного окна. Зеркало втулки (корпуса) изнашивается в зонах впускного и отсечного окон.

При нагнетании топлива плунжером впускное окно постепенно закрывается верхней кромкой плунжера (Рисунок 1-а). В момент перекрытия окна кромкой происходит защемление механических частиц, которые содержатся в топливе. Кроме этого, создается боковое давление на плунжер потоком топлива, подающего насосом.

В конце активного хода отсечная кромка плунжера подходит к отсечному окну. Когда кромки совместятся, между ними сначала образуется узкая щель (Рисунок 1-б). Через нее в отсечное окно устремится поток топлива, находящийся под высоким давлением со стороны над плунжерной полости. Скорость потока велика, и острые кромки подвергаются эрозионному износу.

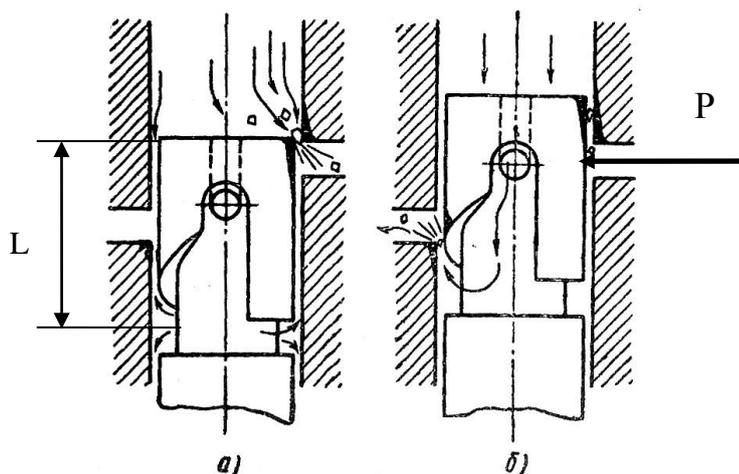


Рисунок 1. Схема абразивного износа плунжерной пары в зоне впускного (а) и отсечного (б) окон втулки (L).

P – давление топлива на плунжер.

Таким образом, износ деталей сопряжения плунжер – гильза, определяющих работоспособность сопряжение и его ресурс, происходит по двум параметрам: 1 – износ плунжера и гильзы за счет бокового давления

топлива, создаваемого насосом; 2- абразивный износ кромок плунжера и гильзы за счет перетекания топлива в процессе его нагнетания.

Прогнозирование ресурса работы сопряжений возможно при наличии обобщенного показателя поведения материалов деталей сопряжения - коэффициента износа. [1].

Коэффициент износа является функцией многих переменных – силовых, скоростных, конструктивных параметров среды и режимов изнашивания.

$$K_{U(x,y)} = \frac{U(x_2)}{V(x_1) \cdot T(x_1) \cdot P(y_1)}$$

Применив метод математического моделирования, как для процессов, протекающих при большом многообразии внешних условий, процесс изнашивания можно выразить в виде математической модели через функцию коэффициента износа с учетом преобразующей системы W.

Входными параметрами являются: силовые $P(Y_1)$, скоростные $V(X_1)$ характеристики, ресурс $T(X_1)$, а также среда $f(\xi)$ и режим работы сопряжения $f(t)$.

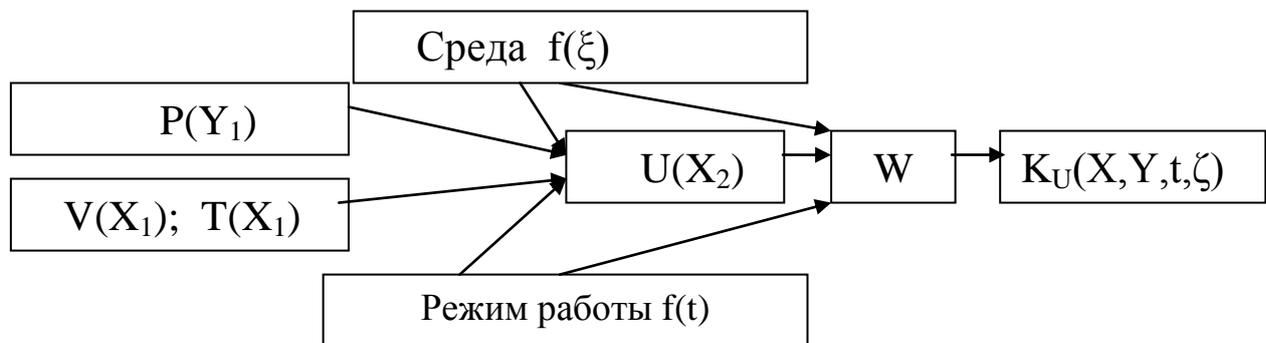


Рисунок 2. Математическая модель процесса изнашивания

Эта математическая модель характеризуется тем, что входные параметры – детерминированные, а система - со случайными параметрами. Поэтому выход модели должна быть случайным, а значит и функция коэффициента износа $K_U(x,y)$ является случайной функцией, изменяющейся во времени.

Коэффициент износа является функцией многих переменных функций, влияющих на износ деталей сопряжения.

$$K_U(X, Y, t, \zeta) = \varphi[P(Y_1), V(X_1), T(X_1), f(\xi), f(t)].$$

Особенностью этой модели является введение двух дополнительных функций – среды работы $f(\xi)$ и режима работы сопряжения $f(t)$.

Среда работы учитывает условия изнашивания при работе на биотопливе, богатого меркаптанами и их влияния на интенсивность изнашивания при водородном охрупчивании металлов.

Режим работы сопряжения учитывает величину простоев, в период которых происходит воздействие метанолов на контактирующие поверхности металлов, обеспечивая их статическое разрушение.

При всех равных условиях силовых и скоростных параметров процесса изнашивания, величина коэффициента износа зависит от времени простоев сопряжений в агрессивных средах биотоплива.

$$K_U(x, y) = \frac{U(x_2)}{V(x_1) \cdot T(x_1) \cdot P(y_1)} \cdot f(\xi) \cdot f(t).$$

Эту функциональную зависимость коэффициента износа материалов деталей конкретного сопряжения с учетом среды и режимов работы можно представить в параметрическом виде

$$K_U = \frac{F_U \cdot L}{S \cdot P} \cdot K_\xi \cdot K_t, \frac{\text{мкм}}{\text{Па} \cdot \text{км}},$$

где F_U - площадь сечения износа элемента сопряжения, мкм · м,

L – длина изнашивания (перекрытия), м,

S – путь трения, км,

P – удельное давление, Па.,

K_ξ · коэффициент, учитывающий агрессивность среды,

K_t - коэффициент, учитывающий простои агрегата.

Путь трения можно представить как произведение скорости относительного перемещения на время перемещения (наработки).

$$S = V \cdot T, \text{ км}$$

Подставив значение пути трения в формулу коэффициента трения и решив уравнение, относительно времени наработки, получим

$$T = \frac{F_U \cdot L}{V \cdot P \cdot K_U} \cdot K_\xi \cdot K_t.$$

Где $F_U \cdot L$ – объем изношенного материала, выражается максимально допустимым износом для деталей данного сопряжения $[U_{max}]$ на площадь изнашивания $S_{из}$.

$$T = \frac{[U_{max}] \cdot S_{из}}{V \cdot P \cdot K_U} \cdot K_\xi \cdot K_t, \text{ час.}$$

Таким образом, критерием при прогнозировании ресурса элементов прецизионных пар, является коэффициент износа материалов деталей сопряжения.

Рассмотрим систему изнашивания деталей сопряжения топливного насоса ДВС.

Износ деталей сопряжения связан с условиями работы. Так при радиальном давлении плунжера на гильзу потоком топлива, создаваемого топливным насосом, износ гильзы в зоне L (рисунок 1) будет односторонний и зависит от геометрических параметров топливного насоса, а также от условий нагружения.

Форма изношенной поверхности корпуса $U_2(\alpha)$ является результатом неравномерного распределения работы трения по длине дуги контакта плунжера (рисунок 3).

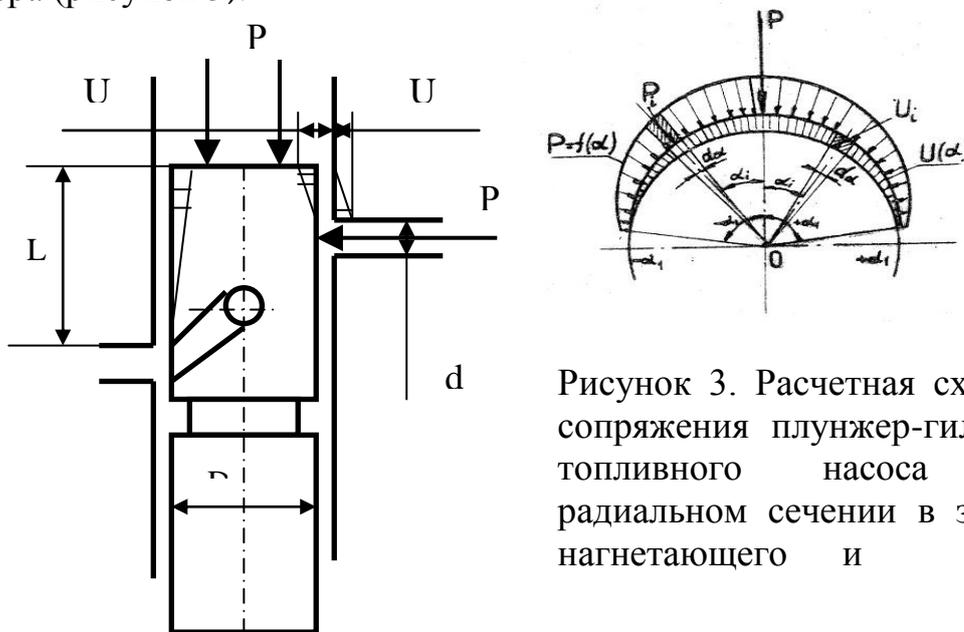


Рисунок 3. Расчетная схема сопряжения плунжер-гильза топливного насоса в радиальном сечении в зоне нагнетающего и

Если приравнять количество затраченной работы трения A_1 и работы A_2 , необходимой для образования износа, ограниченного кривой $U_2(\alpha)$, где A_1 - работа трения, возникающая в сопряжении гильза - плунжер при их относительном перемещении и действия давления, а A_2 – работа, затрачиваемая на износ гильзы 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.

$$dA_1 = \mu \cdot P \cdot L \left[f(\alpha) R_1 \cdot \frac{\cos \alpha}{d} \cdot d\alpha \right],$$

где: μ - коэффициент трения;

P – реакция нагружения, Н

R_1 - радиус плунжера;

L - величина перемещения плунжера (длина перекрытия);

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

α - половина угла контакта.

Вся работа трения при относительном перемещении деталей сопряжения будет

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

где P - реакция в гильзе

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

α – угловая величина перекрытия гильзы и плунжера, мм.

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

$$dA_2 = \frac{\mu \cdot L \cdot U_i(\alpha) d\alpha}{K_U(\alpha)} = \frac{\mu \cdot L \cdot U_i \cdot (U_i + R_Z) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha}{K_U(\alpha)}.$$

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

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

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,

заклученная между первоначальным внутренним контуром корпуса и контуром ее после износа.

Для максимального значения износа корпуса $U_i = U_2$.

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

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

Проинтегрируем это выражение и получим полную площадь поперечного сечения износа

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

Подставив это значение в уравнение работы, получим

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

Приравняв равенство работ, получим коэффициент износа материалов деталей сопряжения корпус плунжер, как функцию угла контакта

$$\frac{\mu \cdot R_1^2 \cdot L \cdot P}{a} = \frac{\mu \cdot L \cdot U_2(U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha}{K_U(\alpha)} \cdot ;$$

Тогда с учетом среды работы $\cdot K_\xi$ и простоев K_t , получим

$$K_U(\alpha) = \frac{4a^2 \cdot U_2(U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha}{D_1 \cdot S \cdot P} \cdot K_\xi \cdot K_t, \frac{\text{мкм}}{\text{Па} \cdot \text{км}}$$

Коэффициент износа материалов деталей сопряжения гильза - плунжер показывает, на сколько микрометров изнашивается гильза радиусом R_2 при контакте с плунжером диаметром D_1 на пути трения S км и давлении P Па.

Тогда время наработки сопряжения до отказа (падение давления нагнетания), при максимально допустимом износе сопряжения плунжер – гильза с учетом простоев в среде биотоплива, определяется по выражению

$$T = \frac{[U_{\max}] \cdot S_{\text{из}} \cdot D_1 \cdot S}{V \cdot 4a^2 \cdot U_2(U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha} \cdot K_\xi \cdot K_t$$

Абразивный износ плунжера и гильзы в местах перетекания топлива в зоне впускного и выпускного окон. Схема износа в зоне впускного окна представлена на рисунке 4.

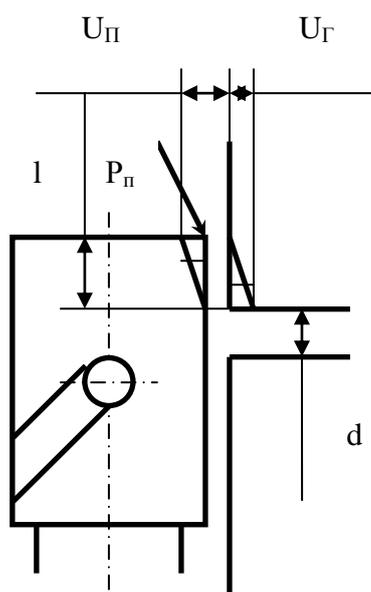


Рисунок 4. Схема износа плунжера и гильзы в зоне впускного окна

Абразивный износ плунжера и гильзы топливного насоса происходит за счет обратного потока топлива в момент рабочего хода плунжера, определяемый перепадом давлений в камере сжатия и канала наполнения. Такой износ приводит к уменьшению количества подаваемого топлива в цилиндр двигателя.

Высота износа плунжера и гильзы определяются диаметром входного окна

$$l = d..$$

Поток топлива с абразивом изнашивает кромку плунжера $-U_{II}$ и кромку гильзы $-U_{Г}$ на длине l , образовав канал шириной, равной диаметру впускного окна d . Это перетекание топлива снижает общий объем топлива, подаваемого в цилиндр.

Если в начальный период работы объем топлива, подаваемого в цилиндр, составлял

$$V_H = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L,$$

где L – максимальный ход плунжера,

D – диаметр плунжера.

То после износа кромок плунжера и гильзы в зоне впускного окна, объем подаваемого топлива составит

$$V^1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (L - l).$$

Перетекание топлива происходит за счет разности давлений через щель сечением (площадью)

$$F = \left(\frac{U_{II} + U_{Г}}{2} \right) \cdot d.$$

Тогда коэффициенты износа материалов плунжера и гильзы с учетом режима работы в среде биотоплива будут

$$K_{U_{II}} = \frac{(U_{II} + U_{Г}) \cdot l \cdot d}{2 \cdot S \cdot P} \cdot K_{\xi} \cdot K_t, \text{ мкм/Па.км}$$

где $S = n_{ц} \cdot V$ - число циклов на скорость перемещения плунжера.

P – давление, создаваемое плунжером, Па.

Число циклов в час определяется из частоты вращения коленвала двигателя n_{δ}

$$n_{ц} = \frac{n_{\delta}}{2} \cdot 60. \text{ час}^{-1}$$

Подставив значение $n_{ц}$ в зависимости коэффициентов износа и решив относительно времени, получим ресурс по износу плунжера и гильзы в зоне впускного окна с учетом простоев при работе в среде биотоплива

$$T_{II} = \frac{60 \cdot P \cdot K_U}{[(U_{II} + U_{\Gamma})_{\max}] \cdot l \cdot d} \cdot K_{\xi} \cdot K_t, \text{ час.}$$

Таким образом, общее время наработки сопряжения плунжер – гильза топливного насоса по допустимым износам тела плунжера и местных износов плунжера и гильзы в зоне впускного окна при работе в среде биотоплива, составит

$$T = \left[\frac{[U_{\max}] \cdot S_{\text{из}} \cdot D_1 \cdot S}{V \cdot 4a^2 \cdot U_2 (U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha} - \frac{60 \cdot P \cdot K_U}{[(U_{II} + U_{\Gamma})_{\max}] \cdot l \cdot d} \right] \cdot K_{\xi} \cdot K, \text{ час.}$$

Выводы. Предложенная методика прогнозирования ресурса плунжерных пар позволяет определять максимальную наработку сопряжения по потери функциональных параметров ДВС из – за износа плунжера и гильзы топливных насосов при различных режимах работы в среде биотоплива.

2. Установлена закономерность изнашивания плунжера и гильзы по всем элементам конструкции, учитывающие силовые, скоростные, конструктивные параметры, а также среду и режим работы, что позволяет прогнозировать общий ресурс насоса, а также прогнозировать потерю мощности двигателя из– за износа элементов топливного насоса.

Литература.

1. Ковалев И.Т., Юдовинский В.Б. Коэффициент износа материалов - показатель надежности сопряжений. Надежность и контроль качества. – М. - 1974, №2. С. 31-38.

2. Юдовінський В.Б., Журавель Д.П., Савченко О.Д. Дослідження процесу зношування основних сполучень деталей сільськогосподарської техніки через коефіцієнт зносу.// Праці ТДАТА. Вип. 15. – Мелітополь, 2003. – с.24-29.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНОСА ПЛУНЖЕРНЫХ ПАР ТОПЛИВНЫХ НАСОСОВ ДВС С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ РЕСУРСА

Дидур В.А., Журавель Д.П., Юдовинский В.Б., Коломоец В.А.

Аннотация

Работа посвящена моделированию процесса изнашивания плунжерных пар топливных насосов ДВС.