

УДК 631.436

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНОСА ЧАСТИЦАМИ АБРАЗИВА, РАЗМЕР КОТОРЫХ МЕНЬШЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА ПЛУНЖЕРНОЙ ПАРЫ ТНВД ДВИГАТЕЛЯ МТА

Вороновский И.Б., инженер

Таврический государственный агротехнологический университет

Тел/факс: 8 (0619) 44-02-74, 8 (0619) 42-25-85

Аннотация – рассматривается износ плунжерных пар ТНВД, его влияние на надежность топливной системы дизельного двигателя и эксплуатационные показатели машинно-тракторного агрегата в зависимости от загрязненности дизельного топлива.

Ключевые слова – дизельное топливо, надежность, абразив, износ, топливная система, эксплуатационные показатели МТА.

Постановка проблемы. Надежность тракторов и сельскохозяйственных машин в значительной степени зависит от надежности дизелей и их топливной аппаратуры. Работоспособность топливоподающей аппаратуры зависит от изношенности ее прецизионных деталей, в частности плунжерных пар. Состояние плунжерных пар в свою очередь зависит от исходного зазора в парах, их наработки, а также от эксплуатационных факторов (концентрация, размеры и свойства абразивных частиц в топливе, температурные условия и др.).

Ведущим видом изнашивания прецизионных деталей топливоподающей аппаратуры является абразивный, который в свою очередь можно разделить на износ абразивными частицами размер которых в каждый момент наработки меньше радиального зазора прецизионной пары, и износ в результате защемления абразивных частиц, размер которых несколько больше радиального зазора прецизионной пары. Наибольшее снижение ресурса абразивный износ вызывает в топливных насосах распределительного типа серии НД, вследствие большей цикличности работы плунжерной пары. В течение цикла работы насоса, скорость возвратно-поступательного движения плунжера во втулке значительно меняется, зазор между ними по длине и в поперечном сечении вследствие нарушения макрогеометрии этих деталей также не остается постоянным. Поэтому вопрос о снижении абразивного износа в насосах распределительного типа имеет большое значение.

Анализ последних исследований. Работы В.В. Антипова, М.А. Бабичева, Д.Ф. Гуревича, М.М. Ташпулатова, М.М. Хрущева, посвященные теории износа плунжерных пар, далеко не полно раскрывают большое многообразие сложных и скоротечных процессов, которые происходят при износе деталей плунжерных пар [1, 2, 3, 6]. При этом принимаются различные условности, далекие от действительных условий работы плунжерной пары. Но реальная картина местных износов поверхностей плунжерных пар значительно отличается от результатов расчетов величины износа по данной теории.

Формулирование цели статьи. Целью статьи является теоретическое исследование процесса износа плунжерной пары ТНВД, его влияние на надежности топливной системы дизельного двигателя и эксплуатационные характеристики работы МТА в зависимости от загрязненности дизельного топлива механическими примесями и водой.

Основная часть. В зависимости от условий эксплуатации МТА, концентрация пыли в воздухе колеблется в широких пределах и в некоторых районах юга Украины достигает 5 г/м^3 . Это отрицательно влияет на работоспособность систем двигателя, в том числе на работоспособность топливной аппаратуры. При работе МТА при запыленности воздуха $1,1-2,5 \text{ г/м}^3$ содержание загрязняющих примесей в топливе к моменту его выработки в 2-3 раза больше, чем при заправке.

Топливные фильтры тракторных дизелей не обеспечивают достаточной степени очистки топлива от механических примесей и воды, которые затем проникают к прецизионным деталям топливной аппаратуры [3, 4, 5]. Вместе с тем загрязнению топлива способствует и то, что во время работы МТА в объеме бака создается разрежение и туда подсасывается пыль. То есть, в топливных баках имеет место "большое дыхание" при расходовании топлива во время работы дизеля и "малое дыхание" при температурных расширениях топлива.

В некоторых работах принимается, что причиной основного износа являются абразивные частицы, величина которых меньше зазора между сопряженными деталями.

Так В.В. Антипов [1] предложил объёмный износ деталей плунжерных пар представить суммой

$$G = G_1 + G_2 + G_3, \quad (1)$$

где G - суммарный износ плунжера, мм^3 ;

G_1 - износ за счет действия абразивных частиц с размерами, несколько меньшими величины зазора, мм^3 ;

G_2 - износ за счет действия абразивных частиц, размер которых превышает зазор плунжерной пары, мм³;

G_3 - износ за счет действия гидроабразивного потока, мм³.

Величина износа G_1 при этом находится по теории предложенной Д.Ф. Гуревичем [2], а величины G_2 и G_3 на основании данных экспериментальных исследований принимать:

$$G_2 = (0,2...0,85) \cdot G_1, \quad G_3 = 0,05 \cdot (G_1 + G_2). \quad (2)$$

Так, М.М. Хрущев и М.А. Бабичев [6] установили, что износ при скольжении можно определить по формуле

$$G_1 = p_{пл} \cdot a_1 \cdot \frac{P \cdot S \cdot d_{аб}}{H}, \quad (3)$$

где $p_{пл}$ - плотность материала плунжера, кг/м³;

a_1 - коэффициент, м⁻¹;

P - нагрузка на абразивную частицу, Н;

S - путь трения, м;

$d_{аб}$ - размер абразивного зерна, мм;

H - твердость металла, Н/мм.

А.В. Ратнер и В.Г. Зеленский [7] по результатам опытов износа сосуда с кварцевым песком предложили формулу

$$G_1 = \frac{a_3 \cdot P^n \cdot S \cdot d}{H}, \quad (4)$$

где a_3 - коэффициент пропорциональности.

Антипов В.В., на основании теории Гуревича, предложил формулу для определения износа G_1 , где учитываются выражения (2-4) [1]

$$G_1 = a_4 \cdot a_5 \cdot a_6 \cdot \frac{p_{пл} \cdot P \cdot S \cdot \delta \cdot N}{H} \cdot (a_{кс} + a_{zn}) \cdot \frac{Q_{ym}}{Q} \cdot K_{об}, \quad (5)$$

где a_4 - коэффициент учитывающий форму абразивных частиц;

a_5 - коэффициент учитывающий качество абразивных частиц;

a_6 - коэффициент пропорциональности;

$p_{пл}$ - плотность материала плунжера, кг/м³;

P - нагрузка на единичную абразивную частицу, Н;

S - путь трения, м;

δ - диаметральный зазор плунжерной пары, мкм;
 N - количество подач топлива за время работы плунжерной пары;

H - твердость металла плунжера;

$a_{кв}, a_{2л}$ - коэффициенты, учитывающие абразивные свойства кварцевых частиц загрязнителей и частиц глинозема;

$Q_{зр}, Q_{ут}$ - цикловая подача топлива и объем утечек топлива;

$K_{об}$ - среднее число абразивных частиц данной фракции в топливе за одну подачу.

Нагрузка на одну частицу определяется по следующему выражению, полученному путем преобразования формулы Герца [1]

$$P = 2,59 \cdot \frac{(1 - \mu^2)^2 \cdot d_{об} \cdot q}{E^2}, \quad (6)$$

где P - нагрузка на одну абразивную частицу, Н;

q - максимальное напряжение (в центре пятна касания), МПа;

$d_{об}$ - диаметр абразивной частицы, мм;

μ - коэффициент Пуассона;

E - модуль упругости материала абразивной частицы, МПа.

Расчет величины износа G_1 , произведенный по формуле (5) предложенной Антиповым имеет существенный недостаток - не принимается во внимание динамика процесса износа, т.е. изменение параметров плунжерной пары вследствие износа. При расчете по формуле (5) на период работы пары N величина ее зазора, утечки топлива, а также диаметр и количество абразивных частиц принимаются постоянными. В действительности же, износ при каждом цикле работы плунжерной пары ведет к увеличению ее зазора, что ведет в свою очередь к увеличению утечек топлива, увеличению размера частиц, попадающих в зазоры, в результате чего увеличивается скорость износа.

Произвести расчет процесса износа в динамике нам позволила организация цикла расчетов в математической программе Mathcad. В качестве шага цикла был принят один час работы насоса на номинальной частоте вращения кулачкового вала. Уменьшение шага цикла ведет к увеличению времени счета программы, без заметного увеличения точности расчетов. При переходе вычисления величины износа плунжерной пары на следующий шаг расчета (на следующий час наработки насосом) с учетом результатов расчетов на предыдущем шаге изменяются величина радиального зазора плунжерной пары, величина утечек топлива через эти зазоры, размер абразивных частиц, участвующих в износе, а также их концентрация в топливе.

С учетом выражений (5) и (6) величина объемного износа абразивными частицами, размер которых меньше величины зазора, за один цикл определяется по следующему выражению

$$G_1 = a_4 \cdot a_5 \cdot a_6 \cdot N \cdot (1 - \mu^2)^2 \cdot d_{об} \cdot S \cdot Q_{ум} \cdot K_{v_{об}} \cdot \frac{\delta_{пр.об.}^3}{E_{об}^2 \cdot H}, \quad (7)$$

где a_4 - коэффициент учитывающий форму абразивных частиц;
 a_5 - коэффициент учитывающий качество абразивных частиц;
 a_6 - коэффициент пропорциональности;
 N - количество подач топлива за время работы плунжерной пары;

μ - коэффициент Пуассона;

$d_{об}$ - размер абразивной частицы, мкм;

E - модуль упругости материала абразивной частицы, МПа;

S - путь трения, м;

$Q_{ум}$ - величина объема утечек, м³/с;

H - твердость металла плунжера;

$K_{v_{об}}$ - количество абразивных частиц данной размерной группы в одном кубическом метре топлива;

$\delta_{пр.об.}$ - предел прочности абразивной частицы, Па.

H - твердость металла плунжера.

Первоначальные значения коэффициентов a_4 , a_5 , a_6 были приняты на основании экспериментальных исследований В.В. Антипова [1]. Далее, значение коэффициента a_6 было скорректировано с учетом наших экспериментальных исследований процесса износа плунжерной пары насоса НД-22/6.

В связи с тем, что величиной шага цикла расчета износа принят один час наработки насоса на номинальной частоте вращения, количество подач топлива насосом НД-22/6 за время продолжительности шага, будет равно

$$N = 60 \text{ мин} \cdot 1100 \text{ мин}^{-1} \cdot 6 = 3,96 \cdot 10^5$$

Коэффициент Пуассона μ принимаем $\mu = 0,2$, согласно [1].

Средний диаметр абразивных частиц участвующих в износе

$$d_{об} = 0,9 \cdot l, \quad (8)$$

где l - величина радиального зазора плунжерной пары, мкм.

Предел прочности кварцевой абразивной частицы $\sigma_{\text{пр.аб}}=206$ МПа [1]. Модуль упругости кварца $E=1,8 \cdot 10^{10}$ Па [1]. Путь трения S можно определить по формуле [1]

$$S = v_{\text{пл.ср}} \cdot t_{\text{пл.ср}}, \quad (9)$$

где $v_{\text{пл.ср}}$ - средняя скорость движения плунжера за время топливоподачи, м/с;

$t_{\text{пл.ср}}$ - среднее время топливоподачи, с;

Величину объема утечек $Q_{\text{ут}}$ в выражении (7) определяем по формуле предложенной И.В. Астаховым [8]

$$Q_{\text{ут}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{пл}} \cdot \Delta P \cdot l^3}{12 \cdot \mu_t \cdot L \cdot \rho_{\text{от}}} \cdot \frac{\alpha}{360} \quad (10)$$

где $d_{\text{пл}}$ - диаметр плунжера, $d_{\text{пл}} = 8$ мм;

ΔP - средняя величина разницы давлений в полости высокого и низкого давлений, принимаем $\Delta P = 20$ МПа;

l - текущий радиальный зазор плунжерной пары, начальное значение $l_0 = 1$ мкм, по мере износа зазор увеличивается в соответствии с определенным значением линейного износа на данном участке;

μ_t - абсолютная вязкость дизельного топлива, принимаем 9 сСт;

L - длина уплотняющей поверхности, для расчета утечек во впускные и отсечные окна принимаем $L = 0,9$ мм, для расчета утечек по основанию плунжера $L = 15$ мм;

$\rho_{\text{от}}$ - плотность дизельного топлива, $\rho_{\text{дт}} = 830$ кг/м³.

α - угол дуги поверхности плунжера по которой происходит утечка топлива, для двух впускных отверстий $\alpha_{\text{вп}} = 2 \cdot 25^\circ = 50^\circ$, для двух отсечных $\alpha_{\text{отс}} = 2 \cdot 35^\circ = 70^\circ$, для утечек по основанию $\alpha_{\text{осн}} = 360^\circ - \alpha_{\text{вп}} = 360^\circ - 50^\circ = 310^\circ$.

Количество абразивных частиц данной размерной группы в одном кубическом метре топлива $Kv_{\text{аб}}$ в формуле (7) можно определить по выражению

$$Kv_{\text{аб}} = \frac{\varepsilon_a \cdot \gamma_p \cdot \rho_{\text{от}}}{\rho_a \cdot V_a}, \quad (11)$$

где ε_a - концентрация абразивных частиц, $\varepsilon_a = 50$ г на тонну;

γ_p - массовая доля определяющей износ размерной группы абразива в общей массе абразива. При использовании абразива зернистостью 2...12 мкм процесс износа будут определять не более 10 % по массе частиц, размер которых соизмерим с зазором плунжерной пары.

$\rho_{\text{дт}}$ - плотность дизельного топлива, $\rho_{\text{дт}} = 830 \text{ кг/м}^3$;

ρ_a - плотность абразивного материала, $\rho_a = 2600 \text{ кг/м}^3$ [1];

V_a - объём одной абразивной частицы, если принять, что частицы имеют сферическую форму, то объём частицы будет равен

$$V_a = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_a^3, \quad (12)$$

где d_a - диаметр абразивной частицы, определяемый по выражению (8).

Выводы. Таким образом, по формуле (7), с учетом выражений (8–12) можно определить износ плунжерной пары за один час работы абразивом, размер которого в каждый период наработки на 10% меньше зазора плунжерной пары. Полученные результаты используются для корректировки зазора плунжерной пары, величины объёма утечек, диаметра абразивных частиц, попадающих в эти зазоры, а также их количества. С учетом этих изменений расчет проводится на следующем шаге, на следующем часе наработки насоса. Особенностью предлагаемого метода расчета является разбиение всего износа на зоны и параллельный их расчет.

Очевидно, что одним из путей повышения надежности работы МТА, а вследствие и коэффициента его готовности, как комплексного показателя, может быть увеличение срока службы фильтров и повышение ресурса прецизионных пар ТНВД, за счет обеспечения требуемой чистоты дизельного топлива, используя фильтры-водоотделители дизельного топлива при заправке его в баки мобильной сельскохозяйственной техники и в системе питания дизеля, а также фильтра пробки заливной горловины топливного бака [9, 10].

При этом увеличивается ресурс работы фильтров тонкой и грубой очистки в два раза, ресурс работы ТНВД в 2,5 раза, а коэффициент готовности топливной системы двигателя МТА повышается с 0,79 до 0,87.

Литература

1. Антипов В.В. Износ прецизионных деталей и нарушение характеристики топливной аппаратуры дизелей / В.В. Антипов. -2-е изд. – М. : Машиностроение, 1992.-Т.1.- 816 с.
2. Гуревич Д.Ф. Основы теории износа плунжерных пар / Д.Ф. Гуревич // Автомобильная промышленность. -1968. – № 2. - С. 20-24.
3. Тишпулатов М.М. Обеспечение работоспособности топливоподающей аппаратуры дизелей / М.М. Тишпулатов. – Ташкент : Фан, 1990. - 128 с.

4. Григорьев М.А. Обеспечение надежности двигателей / М.А. Григорьев, В.А. Донецкий. – М. : Стандарты, 1978. - 324 с.
5. Григорьев М.А. Очистка масла и топлива в автотракторных двигателях / М.А. Григорьев. – М. : Машиностроение, 1970. - 270 с.
6. Хрущев М.М. Абразивное изнашивание / М.М. Хрущев, М.А. Бабичев. - М. : Наука, 1970. - 241 с.
7. Ратнер А.В. Эрозия материалов теплоэнергетического оборудования / А.В. Ратнер, В.Г. Зеленский. – М.-Л. : Энергия, 1986. – 271 с.
8. Астахов И.В. Топливные системы и экономичность дизелей / И.В. Астахов, Л.Н. Голубков. –М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.
9. Декларацийний патент України. Фільтр-водовіддільник / В.М. Кюрчев., І.Б. Вороновський. - № 66522 ; опубл. 17.05.04, Бюл. № 5. - 3 с
10. Декларацийний патент України. Фільтр-водовіддільник / І.Б. Вороновський, Б.І. Вороновський. - № 5544 ; опубл. 15.03.05, Бюл. № 3. – 3 с.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗНОСУ ЧАСТКАМИ АБРАЗИВУ, РОЗМІР ЯКИХ МЕНШЕ ВЕЛИЧИНИ ЗАЗОРУ ПЛУНЖЕРНОЇ ПАРИ ПНВТ ДВИГУНА МТА

Вороновський І.Б.

Анотація – розглядається знос плунжерних пар ПНВТ, його вплив на надійність паливної системи дизельного двигуна та експлуатаційні показники машинно-тракторного агрегату (МТА) в залежності від забрудненості дизельного палива.

DESIGN OF PROCESS OF WEAR BY PARTICLES OF ABRASIVE, SIZE OF WHICH LESS SIZE OF GAP OF PLUNZHERNOY PAIR OF PUMP OF ENGINE OF MTA

I. Voronovsky

Summary

Considered (examined) of deterioration plunzher of pairs pumps his(its) influence on reliability of fuel system of the diesel engine and operational parameters of the machine-tractor aggregates (MTA) depending on pollution of diesel fuel.