

УДК 621.891

**КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
СИСТЕМЕ «МЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕДАЧИ – ТРАНСМИССИОННОЕ
МАСЛО – УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ»**

Войтов В.А., д.т.н., проф., Шевченко А.Н., аспирант, Митиков С.А., инженер

(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко)

В работе на основе теории подобия и моделирования получены критерии оценки трибологических процессов в системе «механические передачи – трансмиссионное масло – условия эксплуатации». Критерии позволяют оценить «жесткость» работы масла в трансмиссии, качество масла и его изменение в процессе эксплуатации, а также время эксплуатации.

Актуальность вопроса

При разработке и эксплуатации различных по конструкции трибосистем средств транспорта возникает необходимость изучения сложных трибологических процессов протекающих в этих системах с целью повышения надежности их работы. Такого рода трибологические задачи успешно решаются методами физического и математического моделирования.

При физическом моделировании производится исследование физически подобных процессов на установках (моделях), сохраняющих физическую природу явлений происходящих в реальных трибосистемах.

Авторами работы [1 – 3] показано, что для сокращения продолжительности дорогостоящих испытаний изделий с целью прогнозирования его ресурса (надежности), необходимо применять модели, общие принципы и положения которых могут служить основой для разработки частных методик испытаний изделий. По мнению авторов, такая модель должна отражать, прежде всего, физическую сущность процессов, с конструктивными и технологическими особенностями изделия и их деталями, а также с условиями эксплуатации.

Анализ публикаций по данной проблеме

Исследование процессов в сложной системе, такой как трансмиссия требует применения положений теории подобия и моделирования [1 – 3]. При проведении исследований очень важно выбрать безразмерные параметры, роль которых могут играть критерии подобия [4, 5]. Авторами работы [6] установлено, что получение критериев подобия и применение критериальных зависимостей значительно сократит объем эксперимента и повысит точность получаемых результатов.

Авторами работ [7, 8] применен критериальный подход при оценке жесткости работы моторного масла, оценки служебных свойств масла и степени их изменения во время эксплуатации. Авторами получены расчетные критериальные зависимости, которые позволяют выбрать моторное масло для эксплуатации в двигателе и оценить сроки его замены с учетом режимов эксплуатации.

Учитывая сложность происходящих процессов в системе «механическая

передача – трансмиссионное масло – условия эксплуатации» и анализируя научную литературу по данному вопросу можно сделать вывод, что на данном этапе исследований необходимо разработать безразмерные критерии, которые будут оценивать механическую трансмиссию как объект с определенной «жесткостью» воздействия на трансмиссионное масло, а также безразмерный критерий оценки служебных (трибологических) свойств масла и безразмерный критерий оценки условий эксплуатации.

Целью работы явилось на основании теории подобия и моделирования получить безразмерные критерии оценки трибологических процессов в системе «механические передачи – трансмиссионное масло – условия эксплуатации».

Методический подход в проведении исследований

К числу определяющих факторов обуславливающих протекание трибологических процессов в рассматриваемой системе на основании обобщения и анализа статистических данных эксплуатации по отказам техники и качеству применяемых масел, относят следующие параметры:

- нагрузка и число циклов ее действия;
- скорость скольжения;
- конструктивные особенности трибосистем агрегата: погрешности изготовления и сборки трибоэлементов; суммарный объем передачи; суммарная жесткость сопряженных поверхностей трения; количество масла в агрегате;
- эксплуатационные свойства масел (противоизносные, противозадирные, антифрикционные противопиттинговые, минимальные потери на внутреннее трение, загрязненность);
- материалы трибоэлементов, их структура, наличие упрочняющих технологий;
- техническое состояние трибосистем агрегата;
- периодичность смены масла.

Анализ работ исследователей занимавшихся изучением трибологических процессов протекающих в различных по конструкции и условиям эксплуатации механизмах показывает, что от учета некоторых перечисленных факторов можно отказаться. Соотношение, отражающие существенные связи между параметрами трибологического процесса и трибоэлементами системы, в которой этот процесс протекает, может быть представлен в виде функциональных зависимостей:

$$\lambda(\sigma_H, \omega_1, m, \Delta_0, v_{sal}, \Theta_M, G_{\Sigma t}, V_{\Sigma}, D_{и}, P_{к}, P_{с}, \mu, \tau, v_{100}, \varepsilon) = 0,$$

$$\varphi(\sigma_H, \omega_1, \Theta_M, t, D_{и}, P_{к}, P_{с}, \mu, \tau, v_{100}, \varepsilon) = 0,$$

где λ – функциональная зависимость для рационального подбора трансмиссионных масел для механических передач;

φ – функциональная зависимость для определения сроков замены трансмиссионных масел;

σ_H – расчетное контактное напряжение в полюсе зацепления, МПа;

ω_1 – угловая скорость вращения, с⁻¹;

m – масса агрегата, кг;
 Δ_0 – погрешности изготовления и сборки зубчатых передач, мкм;
 v_{sal} – скорость скольжения, м/с;
 Θ_M – количество масла в агрегате, кг;
 $G_{\Sigma t}$ – суммарная удельная жесткость сопряженных зубьев, МПа;
 V_{Σ} – суммарный объем передачи, м³;
 $D_{и}$ – показатель износа, характеризующий способность масла предотвращать изнашивание поверхностей трения, м;
 P_k – критическая нагрузка, характеризующая способность масла предотвращать возникновение задира трущихся поверхностей, Н;
 P_c – нагрузка сваривания, характеризующая предельную работоспособность масла, Н;
 μ – коэффициент трения, характеризующий способность масла снижать трение между контактирующими поверхностями;
 τ – противопиттинговая способность, характеризующая способность масла предотвращать усталостное изнашивание поверхностей трения, с.
 ν_{100} – кинематическая вязкость масла, физико-химический показатель характеризующий сопротивление внутреннему трению, м²/с.
 ε – содержание в масле механических примесей, показатель загрязненности масла, кг;
 t – наработка масла, характеризующая его срок службы с.

С целью уменьшения параметров некоторые из них были объединены в комплексы:

$\sigma_H \omega_l$ – комплекс, характеризующий величину, контактных напряжений и число циклов действия нагрузки, кг/(м·с³);

$\Delta_0 v_{sal}$ – комплекс, характеризующий тепловыделения в точках пересопряжения профилей зубьев, из-за ударных нагрузок возникающих в механических передачах, м²/с;

$m/(V_{\Sigma}/G_{\Sigma t})$ – комплекс, характеризующий особенности конструкции агрегатов трансмиссии, с²/м².

Для оценки противоизносных, противозадирных и антифрикционных свойств масел авторами работы [9] предлагается энергетический интегральный критерий. Данный критерий представлен в виде следующей математической зависимости:

$$E_y = \frac{L_1 \cdot P_1 \cdot \mu_1}{D_u^3} \cdot \sum_{i=196}^{P_k} \frac{P_i \cdot L_2 \cdot \mu_i}{D_i^3} + \sum_{j=P_{k+1}}^{P_{c-1}} \frac{P_j \cdot L_2 \cdot \mu_j}{D_j^3} \quad (1)$$

где L_1 – путь трения при определении значения $D_{и}$, м;

P_1 – действующая нагрузка при определении значения $D_{и}$, равная 196 Н;

μ_1 – коэффициент трения при определении показателя износа;

D_u – средний диаметр пятен износа при определении показателя износа, м;

P_i – i -я нагрузка, значение которой берутся по первому нагрузочному

ряду (ГОСТ 9490 – 75) от 196 Н до значения, соответствующего критической нагрузке P_k , Н;

L_2 – путь трения при определении критической нагрузки и нагрузки задира, м;

μ_i – коэффициент трения в четырехшариковом узле трения при действии P_i нагрузки;

D_i – средний диаметр пятна износа нижних шариков при P_i , м;

P_j – j -я нагрузка, значение которой берется по первому нагрузочному ряду (ГОСТ 9490 – 75) от величины нагрузки, следующей после критической P_{k+1} , до значения нагрузки P_{c-1} , предшествующей нагрузке сваривания, Н;

μ_j – коэффициент трения в четырехшариковом узле трения при действии P_j нагрузки;

D_j – средний диаметр пятна износа нижних шариков при P_j , м.

Отношение произведения приложенной нагрузки на путь трения (затраченная работа) к объему изношенного материала, который пропорционален кубу среднего диаметра пятна износа нижних шариков, есть удельная работа изнашивания и характеризует плотность энергии, что является интегральной величиной, которая состоит из трех слагаемых:

1. Удельной работы изнашивания, характеризующей противоизносные свойства смазочной среды, т.е. наличие ПАВ (поверхностно – активных веществ) в масле, первое слагаемое формулы (1).

2. Удельной работы изнашивания, характеризующей предел несущей способности поверхностно – активных веществ в масле, второе слагаемое формулы (1).

3. Удельной работы изнашивания, характеризующей наличие в смазочной среде противозадирных присадок ХАВ (химически – активных веществ), т.е. предел работоспособности масла, третье слагаемое формулы (1).

Чем больше сумма перечисленных слагаемых, тем выше трибологическая характеристика испытуемого масла. Размерность энергетического интегрального критерия, Дж/м³.

В соответствии с правилами получения критериев подобия методом анализа размерностей, в качестве основных единиц измерения были выбраны: длина - L , м; масса - M , кг; время - T , с.

Для разработки обобщенного комплексного показателя, характеризующего напряженность условий работы трансмиссионных масел в выбранной системе единиц измерения использовались следующие сочетание параметров для получения базисного определителя: $[\sigma_H \omega_1] = [L^{-1} M^1 T^{-3}]$;

$$\left[\frac{m}{V_{\Sigma} G_{\Sigma t}} \right] = [L^{-2} M^0 T^2]; \quad [\Theta_M] = [L^0 M^{-1} T^0].$$

О независимости выбранных параметров свидетельствует неравенство нулю базисного определителя, составленного из степеней размерностей указанных величин:

$$D_0 = \frac{m}{V_{\Sigma} G_{\Sigma t} \Theta_M} \begin{vmatrix} L & M & T \\ \sigma_H \omega_1 & -1 & 1 & -3 \\ -2 & 0 & 2 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} = -8.$$

С базисными параметрами связывают оставшийся параметр, входящий в описание процесса $\Delta_0 v_{sa1} = [L^2 M^0 T^{-1}]$, заменив поочередно строки в базисном определителе строкой с размерностью этого параметра, для определения степеней комплексов, из которых состоит критерий подобия.

$$D_{011} = \frac{\Delta_0 v_{sa1} m}{V_{\Sigma} G_{\Sigma t} \Theta_M} \begin{vmatrix} L & M & T \\ 2 & 0 & -1 \\ -2 & 0 & 2 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} = 2, \quad D_{012} = \frac{\sigma_H \omega_1 \Delta_0 v_{sa1}}{\Theta_M} \begin{vmatrix} L & M & T \\ -1 & 1 & -3 \\ 2 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} = 7,$$

$$D_{013} = \frac{\sigma_H \omega_1 m}{V_{\Sigma} G_{\Sigma t} \Delta_0 v_{sa1}} \begin{vmatrix} L & M & T \\ -1 & 1 & -3 \\ -2 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & -1 \end{vmatrix} = 2.$$

По правилам записи формул был получен критерий подобия, оценивающий напряженность («жесткость») работы трансмиссионного масла в механических передачах, который в дальнейшем будем называть $\pi_{ж}$.

$$\pi_{ж} = \frac{\sigma_H^{1/4} \cdot \omega_1^{1/4} \cdot m^{7/8} \cdot \Delta_0 \cdot v_{sa1}}{\Theta_M^{1/4} \cdot V_{\Sigma}^{7/8} \cdot G_{\Sigma t}^{7/8}}. \quad (2)$$

Анализ формулы (2) показывает, что $\pi_{ж}$ принимает наибольшее значение при максимальных значениях σ_H , ω_1 , m , Δ_0 , v_{sa1} и минимальных Θ_M , V_{Σ} , $G_{\Sigma t}$. Это агрегаты трансмиссии, в которых реализуются самые «жесткие» условия работы трансмиссионного масла. Рассматриваемая механическая передача работает с высокими контактными напряжениями и скоростями скольжения, с

большим числом циклов действия нагрузки и погрешностями изготовления, с завышенными массовыми характеристиками при минимальной суммарной удельной жесткости зубьев и суммарном объеме передачи, а также небольшом количестве масла в агрегате.

Для унификации, т. е. сокращения номенклатуры применяемых трансмиссионных масел, в целях снижения в эксплуатации затрат на техническое обслуживание, необходимо оценить начальный уровень эксплуатационных свойств масла числовым параметром, содержащим в себе свертку информации, получаемую при испытаниях масел с помощью лабораторных методов.

В соответствии с методикой описанной выше был разработан критерий π_M , характеризующий уровень эксплуатационных свойств трансмиссионного масла и их изменение в процессе эксплуатации в агрегатах трансмиссии.

При определении базисного определителя в выбранной системе единиц измерения использовались следующие сочетания параметров: $[\tau] = [L^0 M^0 T^1]$; $[v_{100}] = [L^2 M^0 T^{-1}]$; $[\Theta_M] = [L^0 M^{-1} T^0]$. С базисными параметрами связывали оставшийся параметр, $[E_y] = [L^{-1} M^1 T^{-2}]$ входящий в описание процесса.

Критерий π_M , характеризующий уровень эксплуатационных свойств трансмиссионного масла и их изменения в процессе эксплуатации в агрегатах трансмиссии имеет следующий вид:

$$\pi_M = \frac{v_{100}^{1/2} \cdot E_y \cdot \tau^{5/2}}{\varepsilon}. \quad (3)$$

Физический смысл критерия π_M заключается в том, что уровень эксплуатационных свойств трансмиссионных масел выше, когда масло обладает высокими показателями смазочной способности (антифрикционными, противоизносными, противозадирными, противопиттинговыми) и хорошими физико-химическими параметрами при минимальной загрязненности масла.

Для того чтобы определить сроки замены трансмиссионных масел, необходимо знать зависимость изменения критерия π_M от его наработки в агрегатах трансмиссии, т. е. знать, как будет изменяться начальный уровень эксплуатационных свойств масел в процессе их работы. Такие данные можно получить только через натурные испытания трансмиссионных масел. Результатами испытаний будут числовые значения критерия π_M , который будет уменьшаться в процессе эксплуатации из-за изменения параметров E_y , τ , v_{100} и ε .

Определяя условия эксплуатации трансмиссионных масел, при достижении которых обобщенный комплексный показатель будет достигать предельных значений, необходимо учитывать не реальное время работы в часах или пробег в км, а оценивать этот фактор безразмерным числом. При таком подходе будет решаться задача по оценке влияния условий эксплуатации на

изменение первоначального качества трансмиссионных масел.

Для оценки влияния условий эксплуатации на изменение качества трансмиссионных масел был получен критерий π_t .

В целях определения базисного определителя в выбранной системе единиц измерения использовались следующие сочетания параметров: $[v_{100}] = [L^2 M^0 T^{-1}]$; $[t] = [L^0 M^0 T^1]$; $[\sigma_H \omega_1] = [L^{-1} M^1 T^{-3}]$. С базисными параметрами связывают оставшийся параметр, $[\sigma_H \omega_1] = [L^{-1} M^1 T^{-3}]$ входящий в описание процесса.

Критерий π_t , характеризующий условия эксплуатации трансмиссионных масел и влияющий на изменения их качества имеет следующий вид:

$$\pi_t = \frac{v_{100}^{1/2} \cdot \sigma_H \cdot \omega_1 \cdot t^{7/2}}{\Theta_M}. \quad (4)$$

Анализ формулы (4) показывает, что π_t принимает наибольшее значение при максимальных значениях v_{100} , σ_H , ω_1 , t и минимальном Θ_M . Это механические передачи с самыми напряженными условиями эксплуатации, когда при небольшом объеме масляной системы с увеличением наработки масла при больших значениях контактных напряжений и числа их воздействий на активные поверхности трибоэлементов изменяется вязкость масла, происходит срабатывание функциональных присадок с последующим загрязнением масла механическими примесями, которые существенно влияют на ресурс трибосистем.

Подставив в формулы (2 – 4) вместо величин выражения их размерности, получаем, что критерии $\pi_{ж}$, π_M , π_t – безразмерные.

Анализ показателей степеней переменных в формулах (2 – 4) позволяет судить о степени влияния факторов, входящих в критерий $\pi_{ж}$, π_M , π_t .

Уравнения трибологических процессов происходящих в системе «механические передачи - трансмиссионное масло - условия эксплуатации» в критериальной форме могут быть представлены зависимостями:

$$\lambda(\pi_M, \pi_{ж}) = 0, \quad (5)$$

$$\varphi(\pi_M, \pi_t) = 0. \quad (6)$$

Выводы

Таким образом, на основе использования теории подобия и метода анализа размерностей были получены физические модели исследуемых процессов, позволяющие в дальнейшем произвести математическое моделирование рационального подбора трансмиссионных масел (5) и определения сроков их замены (6).

Список литературы

1. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
2. Веников В.А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников, Г.В. Веников. – М.: Высшая школа, 1991. – 439 с.
3. Браун Э.Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.
4. Веников В.А. Современные проблемы моделирования / В.А. Веников // Электронное моделирование. – 1979. – № 1. – С. 12 – 17.
5. Евдокимов Ю.А. Применение методов физического моделирования в электрическом скользящем контакте / Ю.А. Евдокимов, В.Г. Козубенко, В.М. Коротков // Трение и износ. – 1988. – Т.9. – № 4. – С. 696 – 700.
6. Веников В.А. Развитие методов подобия и планирования эксперимента / В.А. Веников, С.Ю. Сыромятников // Электронное моделирование. – 1980. – № 6. – С. 35 – 44.
7. Войтов В.А. Критериальный подход для оценки служебных свойств моторных масел в процессе эксплуатации ДВС / В.А. Войтов, В.А. Мазепа // Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. тр. Тематический выпуск «Автомобиле- и тракторостроение». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – № 10, Т. 1. – С. 135-138.
8. Войтов В.А. Системный подход для эксплуатации моторных масел по техническому состоянию / В.А. Войтов, В.А. Мазепа // Проблеми трибології. – 2006. – № 1. – С. 108 – 117.
9. Войтов В.А. Интегральный критерий оценки трибологических свойств смазочных материалов на четырехшариковой машине / В.А. Войтов, А.В. Левченко // Трение и износ. – 2001. – Т. 22. – № 4. – С. 441 – 447.

Анотація

КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ТРИБОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ «МЕХАНІЧНІ ПЕРЕДАЧІ - ТРАНСМІСІЙНЕ МАСЛО - УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ»

Войтов В.А., Шевченко О.М., Мітіков С.А.

У роботі на основі теорії подібності і моделювання отримано критерії оцінки трибологічних процесів у системі «механічні передачі - трансмісійне масло - умови експлуатації». Критерії дозволяють оцінити «жорсткість» роботи масла в трансмісії, якість масла і його зміна в процесі експлуатації, а також час експлуатації.

Abstract

CRITERIA FOR EVALUATING THE TRIBOLOGICAL PROCESSES IN THE SYSTEM "MECHANICAL TRANSMISSION - TRANSMISSION OIL - OPERATING CONDITIONS"

Vojtov V.A., Shevchenko A.N., Mitikov S.A.

In this paper, based on the similarity theory and modeling criteria are obtained for evaluation of tribological processes in the system, "mechanical transmission - transmission oil - operating conditions." The criteria to evaluate the "rigidity" of the transmission oil, oil quality and its change during operation as well as during operation