

УДК 621.313.303

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ПРОЦЕССЕ ОБКАТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Л.И. БУРГАНСКАЯ, к.ф.-м. н., доцент; Л.А. ХВОЩИНСКАЯ, к.ф.-м. н., доцент;  
В.Г. АНДРУШ, ст.преподаватель; А.Н.СМАЛЬ, студент (УО БГАТУ)

Исследованиями Г.П. Шаронова, И.П. Погорелова, Л.М. Гаенко, Н. В. Храмцова и др. подтверждено, что за счет качественно проведенной обкатки на мотороремонтном заводе межремонтный срок службы двигателя увеличивается на 20-30%. В то же время на проведение обкатки затрачиваются значительные количества топлива, масла, электроэнергии, трудозатрат, происходит загрязнение окружающей среды вокруг ремонтных предприятий. Поэтому становится очевидной задача сокращения времени обкатки двигателей без снижения качества трущихся поверхностей.

Основным недостатком существующих обкаточно-испытательных стендов является проведение обкатки всех двигателей данного типа по одинаковой программе. Качество приработки определяется не столько временем стендовой обкатки, сколько значениями параметров двигателя. Таким образом, каждый конкретный двигатель будет иметь «свое» время приработки.

Показателем хода процесса приработки может служить мощность механических потерь (по моменту прокручивания), тем более, что ее определение на электротормозных стендах не представляет затруднений. На каждом этапе приработки наблюдается снижение механических потерь и их стабилизация.

В качестве информационного параметра оперативного контроля процесса приработки, не требующего разборки двигателя, выбрана мощность механических потерь в контрольных точках.

$$N = 0,104 \cdot M \cdot n \cdot 10^{-3},$$

где  $N$  - мощность механических потерь (кВт);

$M$  - момент сопротивления прокручиванию (Нм);

$n$  - частота вращения коленчатого вала (мин<sup>-1</sup>).

Мощность механических потерь зависит не только от режимов и длительности обкатки, но и от температуры масла двигателя. Наша задача - получить аналитическое выражение для мощности механических потерь двигателя внутреннего сгорания как функции температуры и времени.

Зафиксируем время и найдем зависимость мощности от температуры. При этом мы воспользуемся методом наименьших квадратов и интерполяционным многочленом Ньютона [3].

Введем обозначения переменных. Пусть  $T = x$  - температура масла, а  $N = y$  - мощность механических потерь. Будем искать « $y$ » в виде

квадратичной функции от « $x$ »

$$y = a_1 + a_2 x + a_3 x^2,$$

где  $a_1, a_2, a_3$  - числовые коэффициенты, подлежащие определению. С помощью метода наименьших квадратов подберем коэффициенты  $a_1, a_2, a_3$  так, чтобы сумма  $S$  квадратов отклонений экспериментальных значений от полученных теоретически была наименьшей

$$S = \sum_{i=1}^8 [a_1 + a_2 \cdot x_i + a_3 \cdot x_i^2 - y_i]^2 \quad (1)$$

Составляем таблицу экспериментальных данных, полученных на стенде для двигателя Д-65 (таблица 1).

Для нахождения минимума функции  $S$  приравняем к нулю частные производные функции (1) по параметрам  $a_1, a_2, a_3$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a_1} = \sum x_0 a_1 + \sum x a_2 + \sum x^2 a_3 - \sum y = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial a_2} = \sum x a_1 + \sum x^2 a_2 + \sum x^3 a_3 - \sum yx = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial a_3} = \sum x^2 a_1 + \sum x^3 a_2 + \sum x^4 a_3 - \sum yx^2 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Таблица 1

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$Y_i$	7,1	6,1	4,5	4,3	4,0	3,9	3,6	3,5
$X_i$	20	30	50	60	65	70	80	90

Вычисляя коэффициенты системы (2) по данным из таблицы 1, получим систему линейных уравнений для определения параметров  $a_1, a_2, a_3$ :

$$\begin{cases} 8a_1 + 465a_2 + 31025a_3 = 37, \\ 465a_1 + 31025a_2 + 2234625a_3 = 1944, \\ 31025a_1 + 2234625a_2 + 168610625a_3 = 122460. \end{cases} \quad (3)$$

Решая систему методом Крамера (методом определителей) [2,2], вычисляем приближенные значения коэффициентов  $a_1, a_2, a_3$ :

$$\begin{aligned} a_1 &\approx 9,3606; & a_2 &\approx -0,1297; \\ a_3 &\approx 0,0007. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, получили следующую квадратичную функцию  $y = 9,3606 - 0,1297x + 0,0007x^2$ . (5)

Сравнивая теоретические значения мощности  $N_i$  при заданной температуре с экспериментальными данными  $Y_i$ , вычислим относительные погрешности по формуле

$$\delta_i = \left| \frac{Y_i - N_i}{Y_i} \right|$$

Таблица 2

$A_i$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$
$N_i$	7,0466	6,0996	4,6256	4,0986	3,8876	3,7116	3,4646	3,3576
$\delta_i$	0,0075	0,000066	0,0279	0,0468	0,0406	0,0483	0,00376	0,0406

Из таблицы 2 видим, что погрешности вполне допустимы. Кроме того, мы получили теоретическую кривую, используя интерполяционную формулу Ньютона (см. рис. 1). Видим, что кривая, найденная методом Ньютона, менее точно отражает экспериментальные данные, чем кривая, полученная методом наименьших квадратов.

В данной постановке задача решена не полностью, так как для достижения требуемых эксплуатационных параметров необходимо учитывать и время, за которое производится обкатка. Мощность механических потерь зависит от времени обкатки и температуры масла двигателя. Поэтому необходимо найти формулу, задающую аналитическую зависи-

мость мощности  $N$  как функции температуры масла  $T$  и времени обкатки  $\tau$ .

Пусть  $\tau = X, T = Y, N = Z$ .

Экспериментальные данные, полученные в процессе обкатки двигателя ЯМЗ-236 на Минском АРЗ, представлены в таблице 3. Применим линейную интерполяционную формулу для функции  $Z = f(X; Y)$  двух переменных [3]:

$$Z = \frac{1}{D_3} (D_0 - D_1 X - D_2 Y), \quad (6)$$

где  $D_0, D_1, D_2, D_3$  – определители 3-го порядка:

$$\begin{aligned} D_0 &= \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}, & D_1 &= \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}, \\ D_2 &= \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \end{vmatrix}, & D_3 &= \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

Геометрически это означает, что нужно найти уравнение плоскости, проходящей через три заданные точки  $A_i(x_i, y_i, z_i)$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

Используя данные из таблицы 3, вычислим определители:  $D_0 = -44226, D_1 = -5.7, D_2 = -258, D_3 = -2700$ .

Подставляя значения  $D_0, D_1, D_2, D_3$  в формулу (6), получим интерполяционную формулу

$$Z = \frac{1}{-2700} (-44226 + 5.7 \cdot X + 258 \cdot Y). \quad (8)$$

Для проверки точности вычислений подставим в формулу (8) координаты промежуточных точек  $A_2, A_4, A_6, A_8$ :

$$\begin{aligned} \text{Получим } Z_4 &= 8.99; & Z_6 &= 7.86; \\ Z_8 &= 7.01; & Z_2 &= 10.41; \end{aligned}$$

Относительные погрешности вычислений указаны в таблице 4. То есть, исполь-

зуя метод [3] получили большую погрешность.

Поэтому мы решили провести интерполяцию нашей функции при помощи цепочки плоскостей следующим образом.

Через точки  $A_1, A_3, A_5$  проводим одну плоскость, для которой вычислим определители  $D_0 = -1828, D_1 = 4.8, D_2 = -20, D_3 = -40$  и функцию

$$Z = \frac{1}{-40} (-1828 + 4.8 \cdot x + 20 \cdot y). \quad (9)$$

Аналогично через точки  $A_3, A_5, A_7$  проводим вторую плоскость и находим функцию

$$Z = \frac{1}{-200} (-4520 + 5.4 \cdot x + 16 \cdot y). \quad (10)$$

Через точки  $A_5, A_7, A_9$  – проводим третью плоскость и находим

$$Z = \frac{1}{-160} (-5124 + 0.9 \cdot x + 36 \cdot y), \quad (11)$$

а через точки  $A_7, A_9, A_{10}$  – четвертую плоскость,

$$Z = \frac{1}{-20} (-1064 + 0.8 \cdot x + 10 \cdot y). \quad (12)$$

Ясно, что любые две соседние плоскости пересекаются по прямой линии, проходящей через соседние узлы (см. рис. 2).

Для проверки точности вычислений в полученные уравнения подставим координаты промежуточных точек:  $A_2$  в уравнение (9),  $A_4$  в (10),  $A_6$  в (11),  $A_8$  в (12). Получим значения функции  $Z$  в этих точках:  $Z_2 = 17.1, Z_4 = 14.9, Z_6 = 13.0125, Z_8 = 11.3$ .

Найденные результаты сведем в таблицу 4.

Сравнивая погрешности вычислений первым и вторым методами, заключаем, что второй метод дает значительно более точный результат.

Нами предложено судить о ходе приработки по величине механических потерь, т.е. длительность приработки задавать в зависимости от момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала в контрольных точках – в начале обкатки и после окончания третьей ступени при определенной частоте вращения – 800 мин<sup>-1</sup>. Зависимость мощности от температуры по результатам исследований даётся формулой (5), а зависимость мощности от температуры и времени – формулами (9) – (12).

**Таблица 3**

$A_i$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$A_{10}$
$X_i$ МИН.	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
$Y_i$ °C	54	62	69	76	83	87	92	95	97	99
$Z_i$ кВт	18.7	17.3	16.0	14.9	13.8	12.9	12.0	11.4	11.1	10.9

**Таблица 4**

Точки $A_i$	$A_2$	$A_4$	$A_6$	$A_8$
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ $N_i$	17.3	14.9	12.9	11.4
ЗНАЧЕНИЯ $Z_i$ (I МЕТОД)	10.41	8.99	7.86	7.01
ЗНАЧЕНИЯ $Z_i$ (II МЕТОД)	17.1	14.9	13.01	11.3
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ $\delta_i$ (I МЕТОД)	0.398	0.397	0.391	0.385
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ $\delta_i$ (II МЕТОД)	0.012	0.0	0.009	0.009

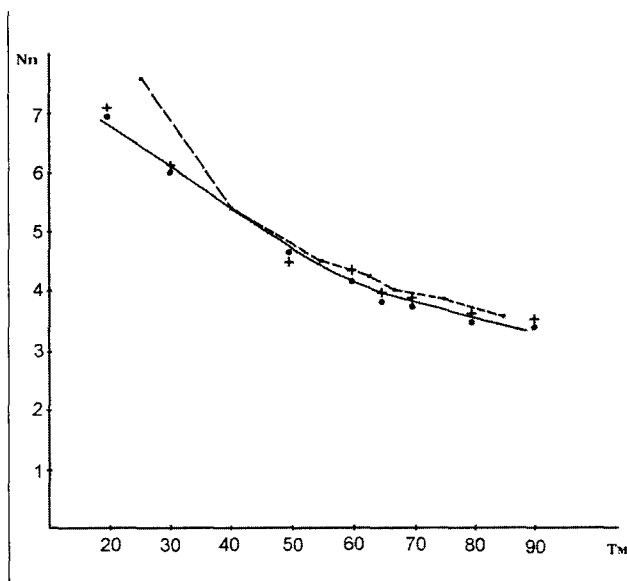


Рис. 1. Зависимость мощности механических потерь от температуры масла:

----- (многочлен Ньютона)  
 ————— (метод наименьших квадратов)

Для того, чтобы уменьшить время измерения момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала в контрольных точках и сократить общее время обкатки, измеряют температуру обкатываемого двигателя, вычисляют на линеаризаторе по формуле (5) или формулам (9), (10), (11), (12) мощность ме-

ханических потерь по моменту сопротивления прокручиванию коленчатого вала обкатанного двигателя при данной температуре. Линеаризатор, вычисляющий мощность механических потерь по формуле (5), проще реализуется на операционных усилителях и аналоговом перемножителе, а вычисляющий по формулам

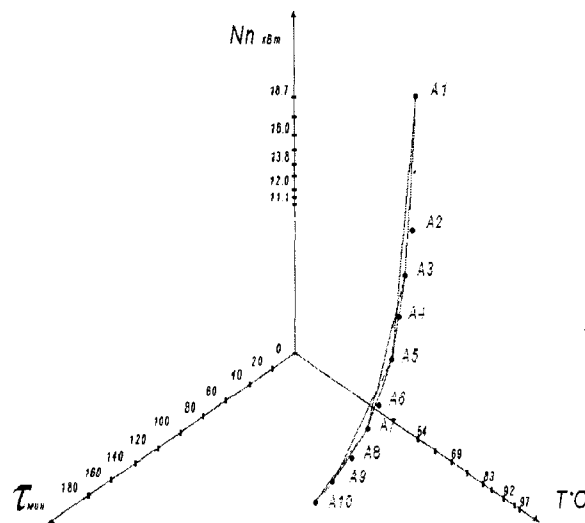


Рис. 2. Зависимость мощности механических потерь от температуры масла и времени обкатки, полученная с помощью цепочки плоскостей

(9) – (12) требует применения более сложной техники вычислений. Затем измеряют мощность механических потерь по моменту сопротивления прокручиванию коленчатого вала обкатываемого двигателя в конкретной контрольной точке при той же температуре, сравнивают их. По разности между величиной мощности меха-

нических потерь обкатываемого двигателя при данной температуре и величиной мощности механических потерь обкатанного двигателя при той же температуре назначается длительность приработки до следующей контрольной точки или окончания приработки. Чем меньше эта разность, тем меньше время, необходимое для приработки обкатываемого двигателя. При этом становится ненужным ожидать достижения определенной температуры обкатываемо-

го двигателя. Но поддерживать определенную температуру двигателя с высокой точностью на протяжении всей обкатки очень сложно, даже применяя специальное оборудование в связи с изменяющимися режимами приработки, температурами окружающей среды, охлаждающей жидкости и т. д.

Данное устройство позволяет сократить общее время обкатки за счет уменьшения времени измерения мощности механических потерь пу-

тём учета влияния температуры обкатываемого двигателя на величину мощности механических потерь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турчак Л.И., Плотников П.В. Основы численных методов. М.: Физматлит, 2002.
2. Гурский Е.И. Основы линейной алгебры и аналитической геометрии. – Мн.: Вышэйшая школа, 1982.
3. Гусак А.А. Высшая математика. Ч. 1. – Мн.: Тэтра систем, 1998.

УДК 631.31:621.891

# К ОДНОЙ МОДЕЛИ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТЕЛ

Ю.ЧИГАРЕВ, д. ф.-м. н., профессор; Б.ДАВЫДОВСКИЙ, д.т.н., профессор; П.КОСТЕНСКИЙ, к.т.н., доцент; О.КЛЕЩЁНОК, студент (УО БГАТУ), (Щецинская сельскохозяйственная академия (Польша))

Под резанием почвы обычно понимают процесс отделения от почвенного массива стружки в виде комков или слоёв телами клинообразной формы. Такими телами могут являться сельскохозяйственные орудия или их элементы. Износ материала будет обуславливаться физическими и геометрическими свойствами тела и почвы.

Исследованиям по износу контактирующих поверхностей с/х элементов посвящено большое число работ, однако данная проблема остаётся актуальной и сегодня [1]. Её решение во многом зависит от модели взаимодействия, которая бы достоверно опи-

сывала процесс износа.

В данной работе на основе принятой модели абразивного изнашивания проводятся некоторые исследования кинематических характеристик.

Как известно, почва состоит из 3-х фаз — газообразной, жидкой и твёрдой. Реологическая модель такой среды представлена на рис.1.

Полная деформация в единичном объёме будет

$$\varepsilon = \alpha_1 \varepsilon_1 + \alpha_2 \varepsilon_2 + \alpha_3 \varepsilon_3, \quad (1)$$

где  $\alpha_i$  и  $\varepsilon_i$  — концентрации и относительные деформации газообразной, жидкой и твёрдой фаз соответ-

ственно. Так как давление с/х орудий и машин на почву меньше 10 атм., то можно считать  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$  и деформирование почвы будет происходить только за счёт переупаковки жидких и твёрдых частиц, т.е. за счёт изменения порового пространства. В износе тел, взаимодействующих с почвой, основную роль играют частицы твёрдой фазы почвы. Очевидно, что твёрдость их намного выше твёрдости трущихся поверхностей с/х элементов. Поэтому можно считать, что в процессе взаимодействия твёрдые частицы не деформируются и не разрушаются.

Реологическую модель с/х элемента можно рассматривать без упрочнения  $c_2 = 0$  и с упрочнением  $c_2 \neq 0$ , рис.2.

Уравнение состояния изнашивающего тела в одномерном случае представим в виде

$$\varepsilon = \sigma \left( \frac{1}{C_2} + \frac{1}{G_2} \right) - \frac{1}{C_2} (k_2 + \mu_2 \dot{\varepsilon}), \quad (2)$$

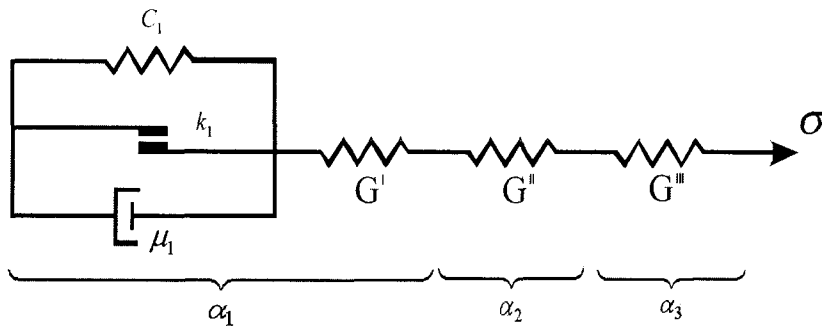


Рис.1