

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ПРИРАБОТЫВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

Валерий Васильевич Остриков<sup>1</sup>  
Сергей Николаевич Сазонов<sup>1</sup>  
Дмитрий Игоревич Афанасьев<sup>1</sup>  
Виктор Сергеевич Вязинкин<sup>1</sup>  
Дмитрий Николаевич Афоничев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве

<sup>2</sup>Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Прирабочное масло в процессе обкатки отремонтированных двигателей тракторов работает в условиях высоких нагрузок и температур, при этом на поверхностях трения происходят физические и химические процессы с изменением свойств металлов и смазочного масла. Для описания происходящих процессов предложено уравнение теплового баланса, учитывающее теплоту, выделяемую при трении, теплоту отводимую маслом, теплоту химической реакции, протекающей в прирабочном масле, и энергию разрушения трущихся поверхностей. Предложено в равенство для определения механической работы деформации слоев металла ввести параметр твердости материала при холодной и горячей обкатке под действием специальных добавок. После математических преобразований получено выражение, описывающее энергию разрушения трущихся поверхностей. Установлено, что теплота, выделяемая при трении, в определенной степени зависит от чистоты прирабочного масла. Определено, что теплота химической реакции в масле на поверхности трения зависит от концентрации поверхностно-активных веществ в прирабочном масле и содержания противоизносной присадки. На основании полученных зависимостей и известных характеристик работы двигателя, а также решения квадратичного уравнения, выведена формула для определения износа для пары трения шейка коленчатого вала – вкладыш. Полученные выражения, которые характеризуют механохимические процессы, происходящие на поверхности трения при обкатке двигателя внутреннего сгорания, могут описывать не только износ, но и в первом приближении процесс старения прирабочного масла. В целом теоретический анализ позволяет сформулировать представления об изменениях свойств прирабочного масла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прирабочное масло, теплота, твердость, износ, химическая реакция, присадка.

## THEORETICAL EVALUATION OF MECHANOCHEMICAL PROCESSES ON THE FRICTION SURFACE OF RUNNING-IN PARTS

Valery V. Ostrikov<sup>1</sup>  
Sergey N. Sazonov<sup>1</sup>  
Dmitry I. Afanasyev<sup>1</sup>  
Viktor S. Vyazinkin<sup>1</sup>  
Dmitry N. Afonichev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture

<sup>2</sup>Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

The break-in oil in the process of running-in of repaired tractor engines acts in the conditions of high loads and temperatures. At the same time the physical and chemical processes occur on the friction surfaces with changes in the properties of metals and lubricating oil. In order to describe the occurring processes the authors propose a heat balance equation that takes into account the heat released due to friction, the heat given off by the oil, the heat of the chemical reaction in the break-in oil, and the fracture energy of the friction surfaces. It is proposed to complement the equation of mechanical work of metal layers deformation with the parameter of material hardness in cold and hot trials under the action of special additives. After mathematical transformations the authors

obtained an expression describing the fracture energy of friction surfaces. It is established that the heat released due to friction depends to a certain extent on the purity of the break-in oil. It is determined that the heat of the chemical reaction in the oil on the friction surface depends on the concentration of surfactants in the break-in oil and the content of antiwear additive. On the basis of the obtained dependences and the known characteristics of the engine operation, as well as the solution of the quadratic equation the authors obtained the formula for determining the wear of the crankshaft neck vs. thrust bearing friction pair. The obtained expressions characterize the mechanochemical processes occurring on the friction surface during the running-in of the internal combustion engine and can describe not only the wear, but also the aging process of the break-in oil in the first approximation. In general, the theoretical analysis allows formulating the concepts of changes in the properties of break-in oil.

KEY WORDS: break-in oil, heat, hardness, wear, chemical reaction, additive, wear.

**П**оявление новых трибопрепаратов, присадок и добавок к маслам требует расширения знаний и объяснения процессов, происходящих на поверхностях трения. Приработочные масла, используемые в процессе обкатки отремонтированных тракторов, работают в особо жестких условиях трения. Особенности процесса приработки отремонтированных деталей обусловлены, прежде всего, качеством ремонта и свойствами используемого масла [10].

Как известно, состав приработочного масла несколько отличается от обычных моторных масел присутствием специальных присадок и добавок, выполняющих специфические функции. При этом на поверхностях трения происходят физические и химические процессы, связанные с изменением механохимической структуры металлов и свойств масла [10].

В соответствии с теорией Д.Н. Гаркунова, Н.В. Крагельского, Б.И. Костецкого, тепловые процессы рассматриваются как генерация тепла с образованием вторичных веществ, находящихся во фрикционном взаимодействии [2, 8, 9].

Одним из важнейших приработываемых сопряжений после проведения ремонта является коленчатый вал – вкладыш. Уравнение теплового баланса для данной пары трения, в соответствии с теорией термодинамики, можно представить следующей формулой:

$$Q = q_{тр.} + q_{хр.} - q_{ом} + \varepsilon_{рм.}, \quad (1)$$

где  $q_{тр.}$  – теплота, выделяемая при трении, кДж;

$q_{ом}$  – теплота, отводимая из зоны трения приработочным маслом, кДж;

$q_{хр.}$  – теплота химической реакции, протекающей в приработочном масле при трении, кДж;

$\varepsilon_{рм.}$  – энергия разрушения (изменения структуры, прочности) трущихся поверхностей, кДж.

Энергия разрушения трущихся поверхностей в соответствии с известной теорией скольжения [1] описывается формулой

$$\varepsilon_{рм.} = \frac{1}{2} W_s, \quad (2)$$

где  $W_s$  – механическая работа деформации слоев металла, кДж.

$$W_s = \frac{\sigma^2 \cdot \Delta V}{E}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – предел упругости материала при сдвиге, скольжении, Па;

$E$  – модуль Юнга, Па;

$\Delta V$  – изменение объема материала при разрушении, м<sup>3</sup>.

В силу того, что прочность материала зависит от его твердости (для наших условий твердость уменьшается под действием температуры и химического компонента, «размягчающего» металл); то с учетом данного эффекта в процессе износа деталей

КШМ, введем в формулу (3) параметр твердости при нормальной температуре (холодной обкатки) и высокой температуре (горячей обкатки) – когда твердость уменьшается на поверхности под действием температуры и добавок, входящих в состав некоторых приработочных масел

$$W_s = \frac{\sigma^2 \cdot \Delta V \cdot HB(t, k)}{E \cdot HB_{xo}}, \quad (4)$$

где  $HB_{xo}$  – твердость металла при нормальной температуре холодной обкатки, НВ;

$HB(t, k)$  – твердость металла при высокой температуре трения и действия химдобавки, НВ.

Заменив отношение твердостей в уравнении (4) на коэффициент твердости  $h_T$ , получим

$$W_s = \frac{\sigma^2 \cdot \Delta V}{E \cdot h_T}, \quad (5)$$

Изменение объема материала при трении зависит от времени процесса обкатки

$$\frac{\Delta V}{T_0} = 3600 \cdot v \cdot S_T, \quad (6)$$

где  $T_0$  – время обкатки двигателя, за которое происходит износ, час;

$v$  – скорость движения трущихся деталей, которую принимают равной частоте вращения коленчатого вала (КВ)  $\omega_{KB}$ ,  $c^{-1}$ ;

$S_T$  – площадь трения,  $m^2$ .

Площадь трения  $S_T$  составляет

$$S_T = \pi \cdot (i \cdot D_{KB}^u + i^2), \quad (7)$$

где  $i$  – суммарный износ поверхностей КВ, м;

$D_{KB}^u$  – диаметр шейки или поверхности трения КВ, м.

В соответствии с уравнением (7)  $\Delta V$  будет равно

$$\Delta V = 3600 \cdot T_0 \cdot \pi \cdot (D_{KB}^u \cdot i + i^2), \quad (8)$$

Тогда

$$W_s = \frac{3600 \cdot \sigma^2 \cdot \pi \cdot T_0 \cdot \omega_{KB} \cdot (i \cdot D_{KB}^u + i^2)}{E \cdot h_T}. \quad (9)$$

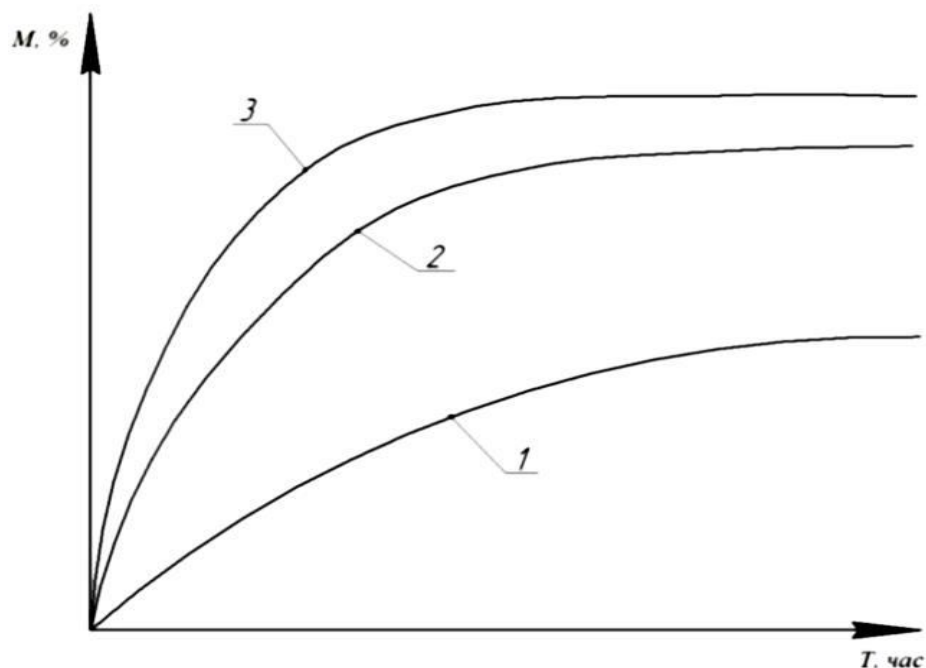
Энергия разрушения трущихся поверхностей определяется формулой

$$W_s = \frac{5655 \cdot \sigma^2 \cdot T_0 \cdot \omega_{KB} \cdot (i \cdot D_{KB}^u + i^2)}{E \cdot h_T}. \quad (10)$$

Как известно, в процессе работы в масле накапливаются механические примеси  $M$  в зависимости от времени работы  $T$  (линия 1, см. рис.).

При проведении операции обкатки отремонтированного двигателя содержание примесей увеличивается более интенсивно (линия 2, см. рис.), чем в обычных условиях работы моторного масла.

При добавлении в приработочное масло «абразивных материалов», способствующих интенсификации процесса выравнивания микровыступов (линия 3, см. рис.), содержание примесей возрастает значительно.



**Зависимость накопления продуктов износа в масле от времени работы ДВС:**

- 1 – накопление механических примесей при работе двигателя;
- 2 – накопление механических примесей при обкатке двигателя;
- 3 – накопление механических примесей при обкатке двигателя при добавлении в приработочное масло «абразивных материалов»

При этом из теории очистки моторных масел в двигателях тракторов известно, что механические примеси удаляются встроенными в систему смазки центрифугами, от эффективности работы которых зависит износ деталей ЦПГ [5].

Тогда условно можно считать, что теплота, выделяемая при трении  $q_{mp}$ , в определенной степени зависит от эффективности процесса очистки масла центрифугами, встроенными в ДВС, на основании чего принимается решение о введении поправочного коэффициента, характеризующего эффективность очистки масла центрифугами  $K_{ц}$ , равного 0,2.

Данное значение коэффициента принимается исходя из того, что известные конструкции центрифуг позволяют удалять или отсеивать 80 % механических примесей [3, 4, 5, 6].

На основании данного условия  $q_{mp}$  может быть уменьшено с учетом  $K_{ц}$ .

Следующей составляющей, входящей в уравнение теплового баланса, является теплота химической реакции в масле  $q_{xp}$ , которая может быть определена с учетом уравнения Вант-Гоффа [7]

$$q_{xp} = R \cdot t_T \cdot V_M \cdot (\ln C - \ln K_p), \quad (11)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $K = 8,314$  кДж/(кмоль · К);

$C$  – концентрация поверхностно-активных веществ, кмоль/м<sup>3</sup>;

$K_p$  – константа химического равновесия, кмоль/м<sup>3</sup>;

$V_M$  – объемная подача масла в зону трения, м<sup>3</sup>/с;

$t_T$  – температура масла в зоне трения, К.

Тогда

$$q_{xp} = 3600 \cdot t_0 \cdot t_T \cdot V_M \cdot (\ln C_i - \ln K_{pi}), \quad (12)$$

где  $C_i$  – остаточное содержание противоизносной присадки в составе приработочного масла, кмоль/м<sup>3</sup>.

Исходя из того, что в зависимости от времени работы масла в двигателе происходит срабатывание присадок, ПАВ,  $C_i$  будет изменяться

$$C_i = C_{\text{ММО}} \cdot \exp(K_{\text{СП}} \cdot T_0), \quad (13)$$

где  $K_{\text{СП}}$  – константа скорости срабатывания присадки (принимается равной 0,001–0,002 ч<sup>-1</sup>).

В результате приработки деталей в процессе обкатки двигателя вырабатываемое на поверхности трения тепло, уносимое смазочным приработочным маслом  $q_{\text{ОМ}}$ , может быть определено по формуле

$$q_{\text{ОМ}} = 3600 \cdot C_M \cdot \rho_M \cdot V_M \cdot T_0 \cdot (t_T - t_k), \quad (14)$$

где  $C_M$  – теплоемкость масла, кДж/(кг · К);

$\rho_M$  – плотность масла, кг/м<sup>3</sup>;

$t_k$  – температура масла в картере двигателя, К;

$V_M$  – объемная подача масла в зону трения, м<sup>3</sup>/с.

На основании полученных зависимостей и известных характеристик работы двигателя, решая квадратичное уравнение, получим формулу для определения износа для пары трения шеек КВ – вкладыш

$$i = -\frac{D_{\text{КВ}}^u}{2} \cdot 0,5 \cdot \sqrt{D_{\text{КВ}}^u + \frac{0,02 \cdot h_0 \cdot h_T \cdot E \cdot (L \cdot K_\phi - q_M + q_x)}{\sigma^2 \cdot \omega \cdot T_{\text{ОМ}}}}, \quad (15)$$

где  $K_\phi$  – коэффициент фильтруемости масла;

$L$  – величина работы трения.

$$L = 3600 \cdot N_{\text{тр}} \cdot T_0, \quad (16)$$

где  $N_{\text{тр}}$  – мощность трения, принимаемая равной максимальной мощности двигателя, кВт.

### **Заключение**

Полученные выражения характеризуют механохимические процессы, происходящие на поверхности трения при обкатке двигателя внутреннего сгорания, и в принципе могут описывать не только износ, но и процесс старения приработочного масла.

### Библиографический список

1. Браук Э.Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э.Д. Браук, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 1982. – 191 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. – Москва : Машиностроение, 1985. – 402 с.
3. Григорьев М.А. Автомобильные и тракторные центрифуги (теория, расчет и эксплуатация) / М.А. Григорьев. – Москва : Машгиз, 1961. – 92 с.
4. Григорьев М.А. Очистка масла и топлива в автотракторных двигателях / М.А. Григорьев. – Москва : Машиностроение, 1983. – 148 с.
5. Григорьев М.А. Очистка масла и топлива в двигателях внутреннего сгорания / М.А. Григорьев. – Москва : Машиностроение, 1970. – 217 с.
6. Остриков В.В. Закономерности процесса удаления продуктов старения из работающего моторного масла в поле центробежных сил / В.В. Остриков, С.Ю. Попов, В.В. Сафонов // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники. – 2014. – № 1. – С. 142–148.
7. Салмин В.В. Улучшение эксплуатационных показателей автотракторных двигателей совершенствованием триботехнических и гидро-термодинамических процессов в смазочных системах: дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / В.В. Салмин. – Саранск, 2003. – 475 с.
8. Трение, изнашивание и смазка / Н.В. Крагельский и др. – Москва : Машиностроение, 1978. – 400 с.
9. Физическая химия. Строение вещества. Термодинамика / К.С. Краснов и др. – Москва : Высшая школа, 1995. – 512 с.
10. Шаронов Г.П. Применение присадок к маслам для ускорения приработки двигателей / Г.П. Шаронов. – Москва : Химия, 1965. – 222 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Валерий Васильевич Остриков – доктор технических наук, зав. лабораторией использования смазочных материалов и отработанных нефтепродуктов ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов», Российская Федерация, г. Тамбов, тел. 8 (4752) 44-65-36, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Сергей Николаевич Сазонов – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории эксплуатационных требований к сельскохозяйственной технике ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов», Российская Федерация, г. Тамбов, тел. 8 (4752) 44-64-24, e-mail: snsazon@mail.ru.

Дмитрий Игоревич Афанасьев – младший научный сотрудник лаборатории использования смазочных материалов и отработанных нефтепродуктов ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов», Российская Федерация, г. Тамбов, тел. 8 (4752) 44-65-36, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Виктор Сергеевич Вязинкин – научный сотрудник лаборатории использования смазочных материалов и отработанных нефтепродуктов ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов», Российская Федерация, г. Тамбов, тел. 8 (4752) 44-65-36, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Дмитрий Николаевич Афоничев – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 224-39-39, e-mail: dmafonichev@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию 16.02.2018

Дата принятия к печати 10.03.2018

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Valery V. Ostrikov – Doctor of Engineering Sciences, Head of the Laboratory for the Use of Lubricants and Waste Oil Products, All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products, Russian Federation, Tambov, tel. 8 (4752) 44-65-36, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Sergey N. Sazonov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Research Scientist, Laboratory of Operational Requirements for Agricultural Machinery, All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products, Russian Federation, Tambov, tel. 8 (4752) 44-64-24, e-mail: snsazon@mail.ru.

Dmitry I. Afanasyev – Junior Research Scientist, Laboratory for the Use of Lubricants and Waste Oil Products, All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products, Russian Federation, Tambov, 8 (4752) 44-65-36, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Viktor S. Vyazinkin – Research Scientist, Laboratory for the Use of Lubricants and Waste Oil Products, All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products, Russian Federation, Tambov, tel. 8 (4752) 44-65-36, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Dmitry N. Afonichev – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 224-39-39, e-mail: dmafonichev@yandex.ru.

Received February 16, 2018

Accepted March 10, 2018