

транспорта». – Т.3, СПб.: Изд-во СПГУВК, 2003 – С. 12-17. 2. Российский речной регистр. Правила (в 3-х т.). М.: Изд-во «Марин инжиниринг сервис», 1995 – Т. 2. – 395 с. 3. Двигатели внутреннего сгорания. Системы поршневых и комбинированных двигателей. [Ефимов С.И., Иващенко Н.А., Ивин В.А. и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 417 с. 4. Бажан П.И. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.В. Каневец, В.М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 342 с. 5. Дизели судовые, тепловозные, промышленные. Насосы для систем охлаждения Метод расчета подачи: ГОСТ 28160-89. – М.: Стандартинформ, 2007. – 5 с.

**Bibliography (transliterated):**

1. Bezjukov O. K. Park dizelej sudov vnutrennego i smeshannogo plavanija i perspektivy ego razvitija / / O. K. Bezjukov, O. V. Afanas'eva / Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Bezopasnost' vodnogo transporta». – Т.3, SPb.: Izd-vo SPGUVK, 2003 – S. 12-17. 2. Rossijskij rečnoj registr. Pravila (v 3-h t.). M.: Izd-vo «Marin inzhiniring servis», 1995 – T. 2. – 395 s. 3. Dvigateli vnutrennego sgoranija. Sistemy porshnevyyh i kombinirovannyh dvigatelej. [Efimov S.I., Ivawenko N.A., Ivin V.A. i dr.]. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 417 s. 4. Bazhan P.I. Spravochnik po teploobmennym apparatam / P.I. Bazhan, G.V. Kanevec, V.M. Seliverstov. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 342 s. 5. Dizeli sudovye, teplovoznye, promyshlennye. Nasosy dlja sistem ohlazhdenija Metod rascheta podachi: GOST 28160-89. – M.: Standartinform, 2007. – 5 s.

УДК 532.5: 532.135; 621.822

**И. Г. Леванов, канд. техн. наук, И.В. Мухортов, инж.**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ  
«ПОРШНЕВОЕ КОЛЬЦО-ЦИЛИНДР»**

Основной целью расчёта трибосопряжения «поршневое кольцо-цилиндр» поршневой машины является определение силы трения. Уточнение математических моделей расчёта таких трибосопряжений является актуальной задачей, поскольку позволяет повышать достоверность расчёта механических потерь [1]. Достоверность расчётов определяются тем, насколько адекватно математическая модель описывает физические процессы, происходящие в трибосопряжениях.

Режим смазки и трения, в котором работают трибосопряжения «поршневое кольцо-цилиндр» двигателей внутреннего сгорания, до сих пор остаётся предметом научных дискуссий и исследований. Сегодня выделяются три точки зрения [1].

Первая – основана на зависимости силы трения от нагрузки, что характерно для граничного режима трения [2-4].

Вторая – объединяет авторов работ [5-8], считающих, что сопряжение «поршневое кольцо-цилиндр» работает в жидкостном (гидродинамическом) режиме трения. Об этом свидетельствуют экспериментально измеренные значения толщины смазочного слоя между кольцом и цилиндром по ходу поршня, превышающие высоту микронеровностей поверхностей.

Третья – заключается в том, что наиболее вероятным режимом трения поршневых колец о цилиндр является переходный от смешанного к граничному (не гидродинамический). В пользу этой точки зрения свидетельствует тот факт, что трение колец о цилиндр определяется не только вязкостью

смазочного масла, а зависит от свойств противоизносных присадок [1]. Иными словами от индивидуальных микрореологических свойств масла.

Силу граничного трения определяют по зависимости Амонтона в виде

$$F = P \cdot f, \quad (1)$$

где  $P$  – нормальная нагрузка на поршневое кольцо;  $f$  – коэффициент граничного трения кольца о цилиндр.

Последний, как правило, определяется из известных экспериментальных данных.

Результаты расчёта по зависимости (1) несколько завышены по сравнению с экспериментальными данными [1].

В предположении о жидкостном режиме трения кольца о поверхность цилиндра сила трения определяется на основе выражения, являющегося следствием закона Ньютона и решения уравнения Рейнольдса [1]:

$$F = \iint_A \left( \frac{\mu v}{h} + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{h}{2} \right) dA, \quad (2)$$

где  $A$  – площадь смоченной поверхности;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $v$  – скорость скольжения тела;  $h$  – толщина смазочного слоя;  $p$  – гидродинамическое давление;  $x$  – координата в направлении скольжения тела.

Как отмечено в [1], расчёты силы трения по зависимости (2) дают заниженные значения силы трения по сравнению с экспериментом.

В настоящее время в расчетах таких трибосопряжений, как «поршневое кольцо – гильза цилиндра» широко используются реологические модели смазочного масла, учитывающие зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры, давления и скорости сдвига, а также модели, учитывающие наличие газообразных, твердых и жидких дисперсных фаз. Вместе с тем, такое широко известное явление, как влияние твердых поверхностей трибосопряжений на вязкость и другие свойства прилегающих слоев смазочного масла, не нашло отражения в известных расчётных методах трибосопряжения «поршневое кольцо – гильза цилиндра».

Как показано в [9], именно образование структурированного граничного слоя смазки (СГС) определяет условия реализации гидродинамического режима трения, т.е. диапазон температур, давлений, скоростей сдвига, шероховатости поверхностей, для данного узла трения.

Данное свойство смазочных материалов, обычно называемое в отечественной литературе «маслянистость», до последнего времени не учитывалось в гидродинамических расчетах узлов трения вследствие отсутствия четких представлений о влиянии адсорбционных слоев на реологические свойства смазок в зазорах порядка 1 мкм.

Вероятно, с этим обстоятельством связаны отличия между экспериментальными данными о силе трения кольца о цилиндр и значениями, полученными с помощью зависимости (2).

В [9] авторами предложен механизм образования углеводородным смазочным маслом полимолекулярных адсорбционных слоев на поверхности металлов и две модели описания реологических параметров СГС. Первая модель описывает зависимость эффективной (кажущейся) вязкости от параметров адсорбционного слоя, вторая модель основана на предполагаемой зависимости предельного напряжения сдвига (СГС) от расстояния до ограничивающей поверхности:

$$\mu_i = \mu_0 + \mu_s \cdot \exp\left(\frac{h_i}{l_h}\right), \quad (3)$$

$$\mu_i = \mu_0 \left[ \exp\left(\frac{l_h}{h_i}\right) \cdot \exp\left(\frac{l_h}{h-h_i}\right) \right], \quad (4)$$

где  $\mu_s$  – условное значение вязкости вблизи поверхности металла, Па·с;  $l_h$  - параметр, характеризующий скорость изменения вязкости при удалении от смачиваемой поверхности и имеющий раз-

мерность длины, м;  $\mu_0$  – вязкость жидкости в объеме, Па·с;  $h_i$  – расстояние до ограничивающей поверхности, м.

Эффективная вязкость в зазоре, ограниченном двумя поверхностями, находится из уравнения

$$\bar{\mu} = \frac{1}{h-h_{S1}-h_{S2}} \int_{h_{S1}}^{h-h_{S2}} \mu(h_i, l_h) dh_i, \quad (5)$$

параметры в котором определяются из условия минимума силы жидкостного трения,

$$F_{mp} = \min \left( \frac{V_0}{(h-h_{S1}-h_{S2})^2} \int_{h_{S1}}^{h-h_{S2}} \mu(h_i, l_h) dh_i \right), \quad (6)$$

где  $V_0$  – скорость смещения поверхностей трения, м/с;  $h_{S1}$  и  $h_{S2}$  – толщины слоев смазки на двух поверхностях, скорости сдвига в которых можно считать равными нулю, м.

Значения эффективной вязкости при различных расстояниях между металлическими или аналогичными по адсорбционным свойствам поверхностями могут быть экспериментально измерены [9].

Определение и включение в гидродинамические расчеты микрореологических параметров смазочных масел необходимы для корректной оценки работоспособности и ресурса трибосопряжений.

Одной из причин, затрудняющих применение микрореологических моделей смазочных масел, является трудность экспериментального определения даже усредненных физических параметров масла в зазорах величиной 1...2 мкм при давлениях и напряжениях сдвига, характерных для реальных узлов трения.

Лаборатория Трибологии Техниона (Израильского технологического института) располагает уникальным оборудованием собственного производства для исследования трибосопряжения «поршневое кольцо – гильза цилиндра».

Кроме того, специалисты этой лаборатории имеют значительный опыт исследований таких сопряжений, в том числе с нанесёнными на поверхность поршневого кольца с помощью лазерного текстурирования (технология LST) порами [10]. По результатам исследований сделан вывод о значительном снижении трения в сопряжении «поршневое кольцо – гильза цилиндра» в случае применения текстурированного поршневого кольца.

Однако, в работах не представлены результаты, отражающие влияние микрореологических (ин-

дивидуальных трибологических) свойств масел на силу трения в сопряжении «поршневое кольцо – гильза цилиндра».

Сотрудниками Вузовско-Академической лаборатории «Триботехника» при участии авторов совместно со специалистами лаборатории Трибологии Израильского Технологического Института – Технион запланированы в июне 2012 году экспериментальные исследования трибосопряжения «поршневое кольцо – гильза цилиндра», работающего на маслах, обладающих отличными друг от друга микрореологическими свойствами.

Результаты экспериментальных исследований помогут лучше понять физические процессы, происходящие при трении в малых зазорах в условиях, близких к реальным, а также уточнить расчётные модели и методики, позволяющие учитывать влияние индивидуальных трибологических характеристик смазывающих масел на работу таких узлов трения ещё на стадии проектирования, и, в конечном итоге, точнее определять механические потери мощности на трение в поршневых машинах.

Представленная работа выполняется при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы», Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-08-00424) и Министерства образования и науки РФ (проект №2012044 – Г3 05).

#### Список литературы:

1. Путинцев С.В. Выбор зависимостей для расчёта сил трения в основных сопряжениях двигателя внутреннего сгорания / С.В. Путинцев, С. Лисинь, С.А. Аникин // Известия вузов. Машиностроение. – 2002. – № 4. – С.50-55.  
2. Рикардо Г.Р. Быстроходные двигатели внутреннего сгорания: Пер. с англ. под общ. Ред. М.Г. Круглова. – М.: ГНТИ, 1960. – 406 с. 3. Энгелиш К. Поршневые кольца: пер. с нем. под ред. В.К. Житомирского. – М.: Машигиз, 1963 – Т.2. – 362 с. 4. Трение, изнашивание и смазка [Текст]: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагель-

ского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 400 с. 5. Петриченко Р.М. Механизм образования смазочного слоя под комплектом поршневых колец ДВС / Р.М. Петриченко, А.Ю. Шабанов // Двигателестроение. – 1987. – № 4. – С. 6-10. 6. Заренбин В.Г. Исследование режимов приработке автомобильных двигателей при капитальном ремонте / В.Г. Заренбин, А.Х. Касумов. – М.: Транспорт, 1983. – 78 с. 7. Трение и теплопередача в поршневых кольцах двигателей внутреннего сгорания: Справочное пособие / Р.М. Петриченко, М.Р. Петриченко, А.Б. Канищев и др. Под ред. Р.М. Петриченко. – Л.: ЛГУ, 1990. – 248 с. 8. Кузнецов Г.К. Управление толщиной масляной плёнки между уплослённым поршневым кольцом и цилиндром [Текст] / Г.К. Кузнецов // Известия вузов. Машиностроение. – 1979. – № 6. – С.67-71. 9. Мухортов И.В. Усовершенствованная модель реологических свойств граничного слоя смазки / И.В. Мухортов, Е.А. Задорожная, И.Г. Леванов, Н.А. Усольцев // Трение и износ в машинах и механизмах, 2010. №5. С. 9–17. 10. Ryk G. Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components / G. Ryk, Y. Kligerman, I. Etsion // Tribology Transaction . – 2002. – Vol.45. – P. 444–449.

#### Bibliography (transliterated):

1. Putincev S.V. Vybor zavisimostej dlja raschjota sil trenija v osnovnyh soprjazhenijah dvigatelja vnutrennego sgoranija / S.V. Putincev, S. Lisin', S.A. Anikin // Izvestija vuzov. Mashinostroenie. – 2002. – № 4. – S.50-55. 2. Rikardo G.R. Bystrohodnye dvigateli vnutrennego sgoranija: Per. s angl. pod obw. Red. M.G. Kругlova. – М.: GNTI, 1960. – 406 s. 3. Jenglish K. Porshnevye kol'ca: per. s. nem. pod red. V.K. Zhitomir'skogo. – М.: Mashgiz, 1963 – Т.2. – 362 s. 4. Trenie, iznashivanie i smazka [Текст]: Spravochnik. V 2-h kn. / Pod red. I.V. Kragel'-skogo, V.V. Alisina. – М.: Mashinostroenie, 1978. – Кн. 1. – 400 s. 5. Petrichenko R.M. Mehanizm obrazovanija smazochного sloja pod komplektom porshnevых kolec DVS / R.M. Petrichenko, A.Ju. Shabanov // Dvigatelistroenie. – 1987. – № 4. – S. 6-10. 6. Zarenbin V.G. Issledovanie rezhimov prirabotke avtomobil'nyh dvigatelej pri kapital'nom remonte / V.G. Zarenbin, A.H. Kasumov. – М.: Transport, 1983. – 78 s. 7. Trenie i teploperedacha v porshnevых kol'cah dvigatelej vnutrennego sgoranija: Spravochnoe posobie / R.M. Petrichenko, M.R. Petrichen-ko, A.B. Kanišev i dr. Pod red. R.M. Petrichenko. – L.: LGU, 1990. – 248 s. 8. Kuznecov G.K. Upravlenie tolwinoy masljanoj pljонki mezhdu maslos#jomnym porshnevym kol'com i cilindrom [Текст] / G.K. Kuznecov // Izvestija vuzov. Mashinostroenie. – 1979. – № 6. – S.67-71. 9. Muhortov I.V. Usovershenstvovannaja model' reologicheskikh svojstv granichного sloja smazki / I.V. Muhortov, E.A. Zadorozhnaja, I.G. Levanov, N.A. Usol'-cev // Tрение i iznos v mashinah i mehanizмах, 2010. №5. S. 9–17. 10. Ryk G. Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components / G. Ryk, Y. Kligerman, I. Etsion // Tribology Transaction . – 2002. – Vol.45. – P. 444–449.

УДК 55.42.00; 55.03.33

**Е.А. Задорожная, канд. техн. наук, В.Г. Караваев, канд. техн. наук**

## **ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНОАГРУЖЕННОГО ПОДШИПНИКА С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА**

**Введение.** Поведение слоя смазки, заключенного между поверхностями трения, описывается системой уравнений гидродинамической теории смазки, теплопередачи, а поверхности трения счи-

таются границами смазочного слоя. При моделировании и расчете сложнагруженных подшипников скольжения стремятся учитывать как можно большее число геометрических, силовых и режимных