

## ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СОПРЯЖЕНИЙ ЦПГ ДВС

*Рассмотрены подходы к оценке обозначенных параметров трибологического состояния контакта поверхностей в сопряжениях «поршневое кольцо - гильза цилиндра», «поршень - гильза цилиндра» в начальный момент движения и малых перемещениях с использованием эксплуатационных натурных элементов конструкции на оборудовании машины СМЦ-2. При этом микропроцессы, происходящие на границе приповерхностных слоев материалов трибологических систем, рассматриваются как феномен. Представлены расширенные возможности разработанного программного продукта по моделированию тепломеханического нагружения контакта «гильза цилиндра - поршневое кольцо», позволяющие выполнять оценку диаметрального износа гильзы цилиндра на прогнозной наработке ДВС.*

### Введение

Решение научно-технических задач по обеспечению высокого уровня надежности трибосопряжений кривошипно-шатунного механизма ДВС при оптимизации тепломеханического нагружения, применение новых конструкционных материалов в условиях формирования поверхностных износостойких структур предполагают дальнейшую разработку и усовершенствование существующих методов определения износа рабочих поверхностей. Контактное взаимодействие поверхностей элементов сопряжений цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) через формирующиеся смазочные слои при протекании рабочих процессов вследствие реализации термодинамического цикла в цилиндре двигателя предопределяет их трибологическое состояние. При этом не минуемо будут протекать сложные микропроцессы формирования и разрушения адгезионно-когезионных связей, адсорбционного взаимодействия между компонентами:

- на границах приповерхностных слоев материалов трибологических систем, например, «СЧ24-44 - Lukoil-Super 15W40 - 4X5MФ1С-Ш» для сопряжения «гильза-цилиндра - компрессионное кольцо», «СЧ24-44 - Lukoil-Super 15W40 - АК4-1» для сопряжения «гильза цилиндра - юбка поршня»;

- между многоатомными молекулами смазочного материала в присутствии поверхностно-активных веществ, метильными и метиленовыми группами;

- например, между карбоксильными группами изомеров и активными центрами металлов.

Реальные эксплуатационные микропроцессы, которые происходят на границе приповерхностных слоев между компонентами каждой из трибологических систем, можно рассматривать, как некоторую «идеальную сущность - феномен, которая имеет непосредственную достоверность, и познать ее можно только интуитивно» [1]. Причем, познать их степень значимости для оценки трибологического состояния возможно не только выполняя моделирование характера и условий взаимодействия поверхностей на малогабаритных образцах, но и воспроизводя сам факт их проявления на эксплуатационных натурных образцах. Последнее представляется сложным, однако полученный результат будет более объективным и значимым для прогнозной оценки износа на любом из этапов изнашивания поверхностей трения. Исходя из приведенного, такой подход в оценке трибологического состояния сопряжений ЦПГ представляется, как феноме-

нологический, поскольку оценивается не сама «идеальная сущность», а факт ее проявления и влияния на оцениваемый параметр по форме наиболее приближенной к эксплуатационной.

### Анализ ранее изданных публикаций

Режимы смазки и трения, при которых протекают процессы взаимодействия элементов трибосопряжений цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС), являются предметом научных дискуссий и исследований. В настоящее время обозначились три основных направления для оценки трибологического состояния рассматриваемых сопряжений [2]. Первое направление предполагает установление зависимости силы трения от нагрузки в зоне контакта  $F_{тр} = f(N)$ , что характерно для граничного режима трения  $\lambda \leq 1$  [3]. Второе направление обусловлено тем, что сопряжение «поршневое кольцо - цилиндр» работает в жидкостном режиме трения (гидродинамический режим)  $\lambda > 3$ . Это может рассматриваться, как бесконтактное взаимодействие. Об этом свидетельствуют экспериментально измеренные значения толщины смазочного слоя между кольцом и цилиндром по ходу поршня, превышающие высоту микронеровностей поверхностей. Третье направление основывается на том, что наиболее вероятным режимом трения поршневых колец о цилиндр является переходный режим от смешанного  $0 < \lambda < 3$  к граничному режиму смазки (не гидродинамический). В пользу этой точки зрения свидетельствует тот факт, что трение колец о цилиндр определяется не только вязкостью смазочного материала, а и характером проявления триботехнических свойств присадочных композиций. При этом проявляются эксплуатационные микрореологические свойства смазочных образований, которые отличаются градиентным распределением. Аналогичным образом можно представить изменение режимов смазки между поверхностями трения гильзы цилиндра и поршня. Принципиальными отличиями контактного взаимодействия в этом случае будут являться:

- характер механической напряженности в образующихся смазочных образованиях при уменьшении нагрузок со стороны колец;

- влияние упруго-пластического контакта на изменение напряжения сдвига во фрикционных контактах с учетом формирующегося «третьего тела» из

компонентов материалов в граничных и приграничных контактных слоях.

В существующих моделях по определению интенсивности изнашивания кольца, гильзы, поршня применяются расчетные значения коэффициента трения, имеющего молекулярную и механическую составляющую [2,3]. При этом его численные значения не отображают реальное трибологическое состояние рассматриваемых сопряжений, обусловленное механическим, тепловым нагружением зон контактного взаимодействия через самоорганизующиеся смазочные слои.

Многофакторностью влияния на трибологическое состояние контакта деталей сопряжения «кольцо-гильза цилиндра», определен вид математической модели, которая позволяет получать расчетные значения интенсивности изнашивания гильзы цилиндра в зависимости от угла поворота кривошипа. В соответствии с этим дается прогнозная оценка ее износа по пробегу автомобиля [4]. При этом данные о порядке математического соотношения учитываемых величин, определяющих связь пути трения верхнего поршневого кольца и пробега автомобиля во время работы двигателя на различных эксплуатационных режимах их использования, не приведены. Более того, открытым остается вопрос о возможности получения поверхности отклика для интенсивности изнашивания с одновременным учетом и частотного диапазона работы двигателя при компьютерном моделировании факторного пространства. Такой подход позволит давать более достоверную и объективную оценку закономерностям изнашивания контактируемых поверхностей с учетом установившихся и неуставившихся эксплуатационных режимов нагружения по мере израсходования ресурса до некоторого предельного технического состояния.

#### **Цель исследования и постановка задачи**

Целью работы представляется разработка методического обеспечения экспериментальных исследований параметров трибологического состояния взаимодействия поверхностей элементов натурных эксплуатационных трибосопряжений «гильза-цилиндра - компрессионное кольцо», «гильза цилиндра - юбка поршня» через смазочные слои для расширения возможностей программного обеспечения на базе существующей математической модели для прогнозной оценки интенсивности изнашивания и износа гильзы цилиндра.

Для достижения обозначенной цели необходимо:

- выполнить анализ технологических возможностей стационарной машины испытания материалов на трение и износ модели СМЦ-2;

- разработать и изготовить дополнительную оснастку для установки натурных эксплуатационных цилиндро-поршневых групп с приводом подвижного звена на вал машины трения;

- определиться с параметрами оценки трибологического состояния взаимодействия рассматриваемых поверхностей трения опираясь на выражения, используемые в прототипной математической модели;

- определить возможные моделируемые условия теплового и механического нагружения зон контакта поверхностей трения;

- реализовать программный продукт на базе прототипной математической модели с расширенными функциональными возможностями.

#### **Изложение основного материала исследования и его обсуждение**

Анализ технологических возможностей стационарной машины СМЦ-2 показал следующее. В соответствии с габаритными размерами цилиндропоршневых групп, диаметр цилиндра  $d_{max}=120$  мм; длина гильзы цилиндра  $l_{max}=300$  мм, имеется возможность для неподвижного закрепления сборочной единицы ЦПГ без шатуна на верхней площадке корпуса нагружающего устройства. Для этого необходимо дополнительно применить стремянку фиксации гильзы и ее опорный кронштейн, к которому с помощью болтового соединения будет притягиваться корпус стреманки, прижимая к опоре машины исследуемую ЦПГ. Для использования датчика сопротивления перемещению на нижний приводной вал необходимо дополнительно установить переходную втулку с маховиком. Тогда, при использовании связи между пальцем поршня и маховиком в виде тросового соединения, возможно, фиксировать сопротивление движению поршня с кольцами по поверхности гильзы цилиндра. Схема компоновки приведенных элементов приведена на рис.1.

Анализ схемы контактного взаимодействия элементов системы нагружающих поверхность гильзы цилиндра, рис.2, а также математическое выражение, используемое для определения текущего значения коэффициента трения в прототипной модели, позволил сделать заключение о следующем.

В качестве параметров оценки трибологического состояния на данном этапе исследования необходимо рассматривать: сдвиговое сопротивление молекулярной связи двух поверхностей,  $\tau_0$ ; пьезокоэффициент молекулярной составляющей,  $\beta$ ; молекулярную и механическую составляющие суммарного коэффициента трения при перемещениях с малыми скоростями движения. Причем сдвиговое сопротивление через граничные смазочные образования 6,8,9, рис.2 определятся с учетом измеряемой силы трения покоя и геометрии контакта нагружающих элементов. Используя же неравномерность износа гильзы по длине хода поршня возможно изменение значений удельных давлений колец при трении, что обусловит определение значения пьезокоэффициента. Изменяя условия контакта поверхностей за счет линейного расширения металлов при общем нагревании сборочной единицы нагревательным элементом 4, рис.1, и внося в зоны трения компоненты смазочного материала, обуславливается возможность определения обозначенных параметров уже с учетом объемных смазочных образований. Причем моделируемые условия механического нагружения определяются силами упругости поршневых колец и имитируемой нагрузкой на юбку поршня, а тепловое нагружение, как приведено выше, нагревательным элементом. Температурный режим может находиться в пределах от  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $120^{\circ}\text{C}$ .

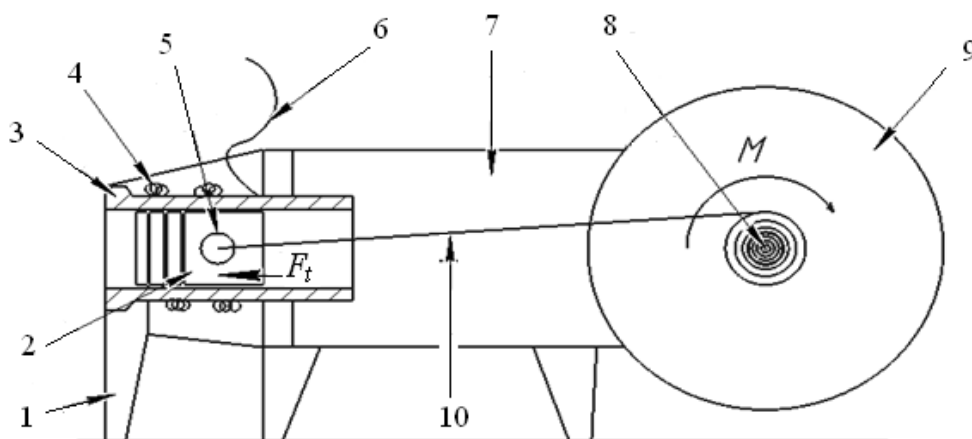


Рис.1. Схема установки натурной эксплуатационной ЦПГ на станине машины модели СМЦ-2:  
1 - станина; 2 - поршень в сборе с кольцами и пальцем; 3 - гильза; 4 - нагревательный элемент; 5 - палец; 6 - провод термопары; 7 - корпус машины; 8 - вал машины; 9 - шкив; 10 - трос

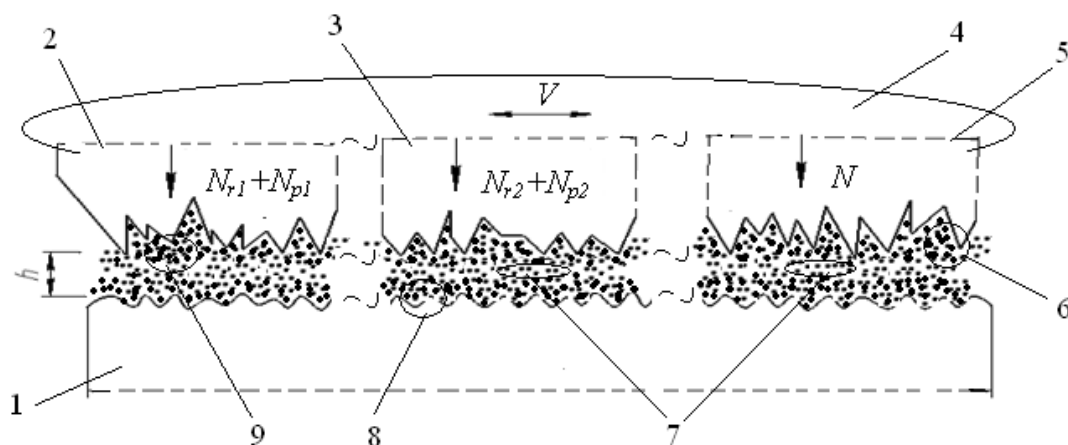


Рис.2. Схема комплексного контактного взаимодействия фрагментов микропрофилей поверхностей элементов ЦПГ через смазочные образования:

1 - гильза цилиндра; 2 - первое компрессионное кольцо; 3 - второе компрессионное кольцо; 4 - система нагружающих элементов; 5 - юбка поршня; 6, 8, 9 - граничные смазочные образования; 7 - смазочная среда объемного взаимодействия;  $N_{r1}, N_{r2}$  - радиальная сила упругости колец,  $N, N_{p1}, N_{p2}$  - радиальная сила давления газов,  $N, N$  - нормальная сила,  $N$ .

В соответствии с математической моделью [4] реализован программный продукт с использованием языка программирования C++ с дополнительным использованием библиотек Qt. Окна программного продукта приведены на рис.3. В качестве среды разработки использовался Qt Creator версии 5.5.

Отличительной чертой в составленном алгоритме расчета является:

- выбор одного из условий контактирования [5]: «жесткая сфера внедряется в упругое полупространство» и «жесткая сфера внедряется в пластическое полупространство». Последнее условие характерно для трибофизических процессов, протекающих в сопряжении при ис-

пользовании структур с низкими сопротивлениями сдвига, например при формировании смазочных образований (структурированные слои ионов металлов) из присадочных композиций в моторные масла [6], а также при формировании пленок из меди на поверхности гильзы [7];

- выбор расчета диаметального износа в соответствии с обобщенным скоростным режимом работы ЦПГ и при долевым выражении наработок изделия на соответствующей частоте вращения коленчатого вала, имеющей вероятностный характер изменения.

Диаметральный износ  $\Delta_D$  (мкм) гильзы цилиндра предлагается определять в соответствии с обобщенным по скоростному режиму работы ЦПГ выражением (1).

$$\Delta_D = I_i \cdot L_{\text{тр}} = I_i \cdot 0,036 \left[ L - h_{\text{вк}} - \frac{L}{180} (\phi_{\text{min}} - 180) \right] \cdot n \cdot T_m \quad (1)$$

где  $I_i$  - интенсивность изнашивания гильзы цилиндра, рассчитанная в соответствии с предложенной в рабо-

те [4] математической моделью, при этом используется значение для соответствующего сечения гильзы ( $i$  - й

угол поворота кривошипа);  $L_{mp}$  - путь трения верхнего поршневого кольца, мм;  $n$  - частота вращения коленчатого вала двигателя,  $\text{мин}^{-1}$ . Для расчета используется численное значение двойственного содержания. С одной стороны - это значение, при котором производится динамический расчет двигателя, и определяются значения нормальной силы  $N$ . С другой стороны - это усредненная частота, характерная для основного времени использования по назначению изделия. Например, в модели эксплуатации дизеля грузового автомобиля в городских условиях  $n_{cp}=0,47n_n$  в модели эксплуатации дизеля зерноуборочного комбайна  $n_{cp}=0,79n_n$ , в модели эксплуатации дизелей сельскохозяйственных колесных и гусеничных тракторов  $n_{cp}=0,9n_n$  [8];  $h_{вк}$  - расстояние от торца поршня до первого компрессионного кольца, м;  $T_m$  - прогнозная наработка при которой оценивается диаметральный износ, мин. Прогнозируемая величина наработки может пересчитываться в условные тыс.км пробега, в соответствии с принятой методикой. Например, для легкового автомобиля 1 мото-час = 25 км;  $L$  - значение хода поршня цилиндра двигателя соответствующего изделия: автомобиль; трактор; комбайн и др, мм;  $\varphi_{min}$  - значение угла поворота кривошипа при последнем значении минимальной интенсивности изнашивания (в соответствии с гра-

$$\Delta_D = 0,036 \cdot 10^6 L_{тр} n_n T_m \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i I_{hi} = 0,036 \cdot 10^6 \left[ L - h_{вк} - \frac{L}{180} (\varphi_{min}^I - 180) \right] n_n T_m \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i I_{hi} \quad (2)$$

где  $\alpha_i$  - доля времени наработки  $T_m$  на  $i$  - м скоростном режиме, например  $\alpha_i=0,1; 0,4; 0,2; 0,3$  на режимах  $0,22 n_n; 0,46 n_n; 0,71 n_n; 0,57 n_n$ ;  $\beta_i$  - доля частоты вращения коленчатого вала ДВС на соответствующем скоростном режиме;  $n_n$  - номинальная частота вращения колен-

чатого вала двигателя,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $I_{hi}$  - долевая интенсивность изнашивания при соответствующей частоте вращения, соответственно на скоростных режимах  $0,22 n_n; 0,46 n_n; 0,71 n_n; 0,57 n_n$ .

фическими расчетными зависимостями). Например, для представленной в работе [4] графической зависимости  $\varphi_{min}=244^\circ$ .

Так, для двигателя с исходными параметрами (рис.1 а) для условия контактирования «жесткая сфера внедряется в упругое полупространство» прогнозные диаметральный износ гильзы цилиндра составляют:

- при  $L_{mp}=0,036$  м;  $n=3600 \text{ мин}^{-1}$ ;  $T_m=720000$  мото-мин (300000 км пробега);  $I_i=2,1 \cdot 10^{-10}$ ;  $\Delta_D=705,4 \text{ мкм}$  - это очень жесткие условия работы деталей ЦПГ;
- при  $L_{mp}=0,036$  м;  $n=1850 \text{ мин}^{-1}$ ;  $T_m=480000$  мото-мин (200000 км пробега);  $I_i=2,1 \cdot 10^{-10}$ ;  $\Delta_D=241,67 \text{ мкм}$  - это средние по загруженности и продолжительности условия работы ЦПГ.

при  $L_{mp}=0,036$  м;  $n=1260 \text{ мин}^{-1}$ ;  $T_m=240000$  (100000 км пробега) мото-мин;  $I_i=2,1 \cdot 10^{-11}$ ;  $\Delta_D=8,2 \text{ мкм}$  - это самые благоприятные условия работы ЦПГ.

Полученные результаты хорошо согласовываются как с эксплуатационными данными типовых двигателей семейства ЗМЗ, так и результатами, приведенными в работе [4]. С учетом долей работы ДВС на различных скоростных режимах и средней продолжительности времени работы на них диаметральный износ  $\Delta_D$  (мкм) предлагается рассчитывать в соответствии с выражением (2).

чатого вала двигателя,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $I_{hi}$  - долевая интенсивность изнашивания при соответствующей частоте вращения, соответственно на скоростных режимах  $0,22 n_n; 0,46 n_n; 0,71 n_n; 0,57 n_n$ .

Программа расчета интенсивности изнашивания гильзы цилиндра двигателя внутреннего сгорания

### Входные данные:

Параметры материалов и конструкции

Диаметр цилиндра, м: 0.092

Ход поршня, м: 0.086

Длина шатуна, м: 0.255

Радиус кривошипа, м: 0.043

Высота кольца, м: 0.002

Расстояние от верхнего кольца до дна поршня, м: 0.02

Частота оборотов коленчатого вала: 3600

Теплопроводность стенки цилиндра(чугун), м2/с: 0.000026

Коэффициент теплопроводности гильзы цилиндра(чугун), Вт/м\*С: 48

Коэффициент теплопроводности кольца(сталь), Вт/м\*С: 52

Условие контактирования

«Жесткая сфера внедряется в упругое полупространство»

Сдвиговое сопротивление молекулярной связи двух поверхностей при фактическом давлении в зоне контакта  $\mu=0 \text{ кгс/см}^2, \text{ кгс/мм}^2$ : 0.1

Пьезокоэффициент молекулярной составляющей: 0.1

Радиус кривизны единичной неровности, моделированной в виде сферы (более твердого тела), мм: 100

Модуль упругости материала кольца, ГПа: 155

Коэффициент Пуассона материала кольца: 0.25

Коэффициент гистерезисных потерь при скольжении: 2.64

Параметры связанные с углом поворота кривошипа

Шаг увеличения угла поворота: 20

Значения нормальной силы  $N_i$ , Н:

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| 10   | 2710 | 2610 | 10   | 3300 | 4300 | 3770 | 1600 | 70   | 10   | 290  | 650 | 3480 | 3900 |
| 3330 | 10   | 2900 | 3400 | 10   | 6120 | 3400 | 1660 | 3120 | 3840 | 2390 | 440 | 5    | 145  |
| 290  | 1810 | 3480 | 3910 | 410  | 2430 | 3330 | 3980 | 10   |      |      |     |      |      |

Значения давления газов в цилиндре  $P_i$ , МПа

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-------|
| 0.12 | 0.11 | 0.86 | 0.04 | 0.17 | 0.03 | 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.09 |     |       |
| 0.1  | 0.1  | 0.2  | 0.5  | 0.9  | 0.1  | 2.5  | 2.65 | 1.4  | 0.8  | 0.6  | 0.4  | 0.3 | 0.008 |
| 0.8  | 0.06 | 0.05 | 0.02 | 0.02 | 0.06 | 0.09 | 0.1  |      |      |      |      |     |       |

Значения температуры стенки цилиндра  $T_i$ , градус Цельсия:

|     |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| 200 | 185 | 165 | 150 | 120 | 100 | 80 | 65 | 50 | 30 | 50 | 70 | 80 | 90 | 100 | 150 | 165 | 185 |
| 200 | 185 | 165 | 150 | 120 | 100 | 80 | 65 | 50 | 30 | 50 | 70 | 80 | 90 | 100 | 150 | 165 | 185 |
| 200 |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |

Рассчитать I

Промежуточные значения

|     |             |
|-----|-------------|
| 180 | 2.85164e-13 |
| 200 | 1.38569e-12 |
| 220 | 2.04351e-12 |
| 240 | 3.15371e-12 |
| 260 | 3.7826e-12  |
| 280 | 3.93316e-12 |
| 300 | 1.10931e-11 |
| 320 | 2.41597e-11 |
| 340 | 4.39069e-11 |
| 360 | 1.31523e-12 |
| 380 | 1.28072e-10 |

Рассчитать DeltaD

Промежуточные значения

Без учета долей работы ДВС

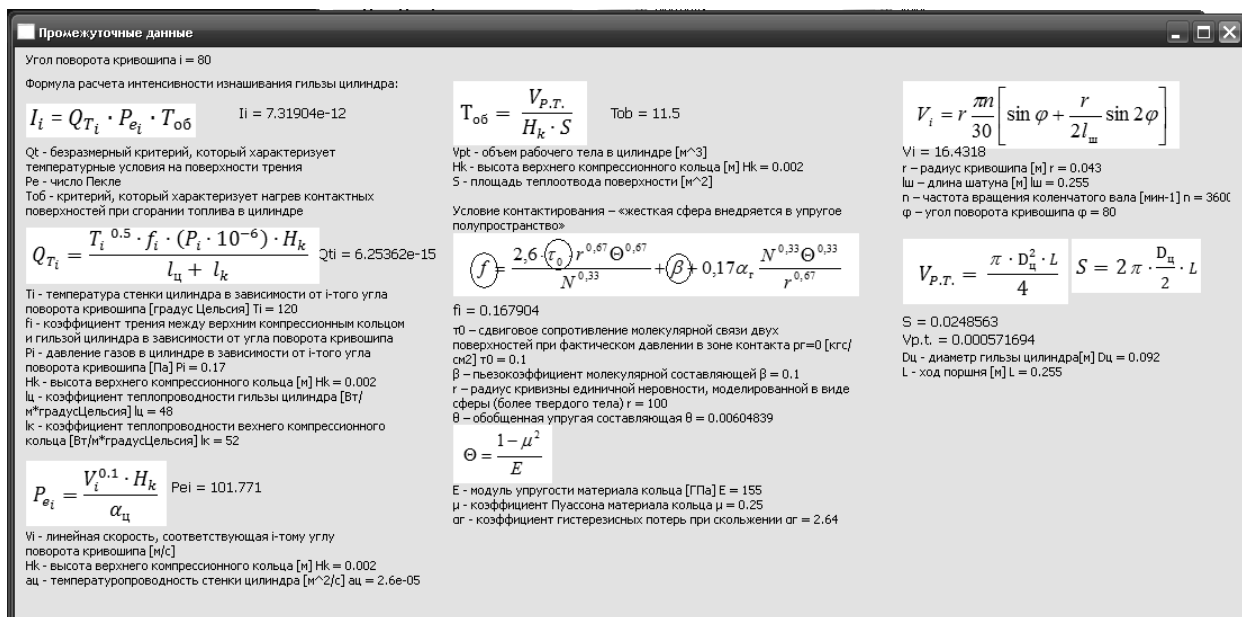
Значение угла поворота кривошипа при первом значении минимальной интенсивности изнашивания на графике  $\varphi_{min}$ : 240

Наработки, мото-мин: 720000 240000 480000

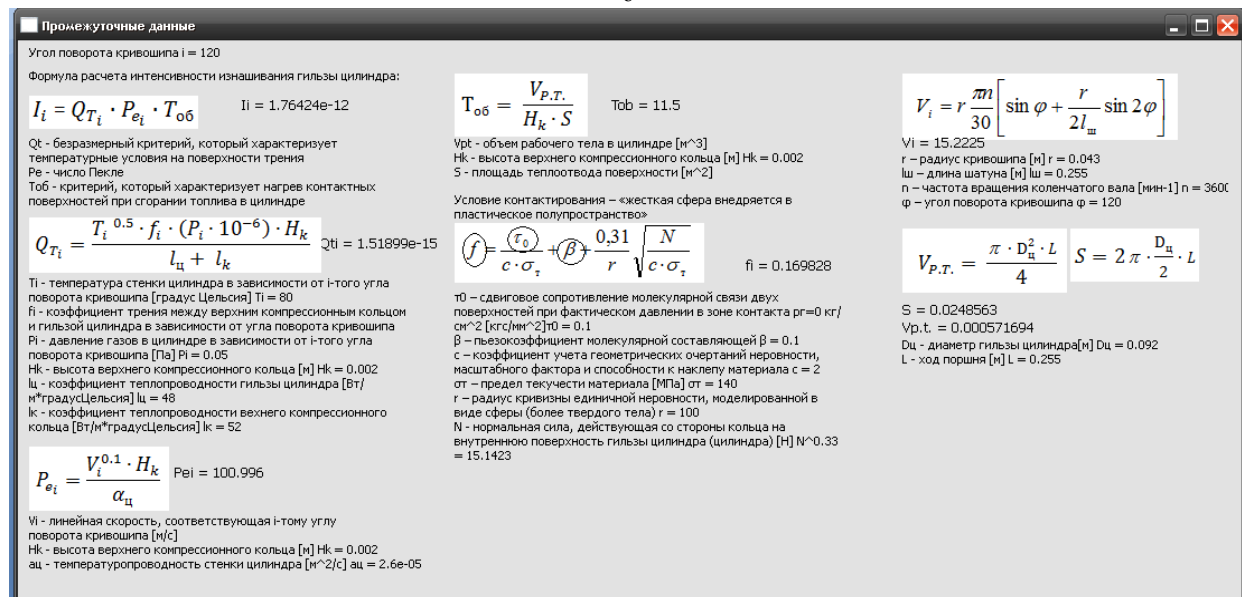
Интенсивность изнашивания  $I_i$ : 0.00000000021

Наработки [мото-мин] Диаметральный износ [мкм]

|        |         |
|--------|---------|
| 720000 | 731.566 |
| 240000 | 243.855 |
| 480000 | 467.711 |



б



в

Рис.3. Окна программного продукта:

а - стартовое окно для ввода исходных параметров и выбора условия контактирования; б - отображение промежуточных расчетов для условия контактирования «жесткая сфера внедряется в упругое полупространство»; в - отображение промежуточных расчетов для условия контактирования «жесткая сфера внедряется в пластическое полупространство»

Помимо приведенных на рис.3 окон программного продукта также есть возможность графического вывода расчетных зависимостей  $I_i=f(\varphi)$  и  $\Delta_D=f(T_m)$ . Графические зависимости могут использоваться для анализа характера влияния геометрических параметров ЦПГ, механических свойств материалов деталей, параметров шероховатости кольца, параметров молекулярной связи двух поверхностей через смазочные образования на величину

Наличие сведений о параметрах, характеризующих непосредственно трибологический контакт эксплуатационных поверхностей: определяет целесообразность использования значений уже не объемных, а поверхностных свойств материалов деталей; позволяет получать

интенсивности изнашивания поверхности гильзы. Формируемые контактным взаимодействием смазочные образования рассматриваются, как результат феномена, проявляющийся с различной функциональной эффективностью. При этом тонкие поверхностные слои, толщиной от 1 до 15 мкм могут иметь различный градиент механических свойств по глубине, что предопределяется закономерностями формирования вторичных структур.

более объективный результат в пределах предложенного программного продукта. Открытым остается вопрос о возможности оценки интенсивности изнашивания смазочных образований при граничной смазке, когда параметры шероховатости не оказывают существенного

влияния на нарушение сплошности полимолекулярных смазочных слоев.

#### **Выводы**

Рассмотренные в работе подходы позволили для прогнозной оценки диаметального износа гильзы цилиндра в соответствии с расширенными возможностями разработанного программного продукта по обозначенным параметрам трибологического состояния поверхностей трения предложить методику оценки взаимодействия элементов сопряжений натуральных эксплуатационных ЦПГ в лабораторных условиях.

Для дальнейшего совершенствования предложенного программного продукта предлагается в соответствии с различными частотами вращения коленчатого вала ДВС, например  $n_1 - n_5$ , разработать алгоритм формирования соответствующих массивов данных для значений сил, нагружающих гильзу цилиндра на различных этапах работы ЦПГ для конкретных условий взаимодействия поверхностей трения. Наличие зависимостей  $I_i = f(\varphi_i)$  и соответствующих им рассчитанным износам предопределяет с помощью программной среды формирование графически отображаемого многофакторного пространства, например  $A_D = f(n_i, T_m)$  для каждого сечения гильзы цилиндра, что представляется как направление дальнейших исследований.

#### **Список литературы**

1. Феноменологический подход. Технический словарь [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.ai08.org/>. 2. Леванов И.Г. Экспериментальные исследования трибосопряжения «поршневое кольцо-цилиндр» /И.Г. Леванов, И.В. Мухотров// Двигатели внутреннего сгорания. - 2012. - №2. - С.64-66. 3. Загайко С.А. Математическое моделирование изнашивания деталей ЦПГ ДВС/С.А. Загайко//Уфа:УГАТУ. - 2013. - №3. - С.231-238. 4. Микосянчик О.О. Моделирования интенсивности зношування гільзи циліндра двигуна внутрішнього згорання /О.О. Микосянчик, Р.Г. Мнацаканов Р.Г., М.С. Хімко// Проблеми тертя та зношування. - НАУ.- 2015.- 1(65). - С.140-145. 5. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ /И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. М.: Машиностроение, 1977, - 526 с. 6. Ильин А. П. Влияние суспензии «моторное масло + смесь нанопорошков меди и никеля» на трибологические свойства пары трения «углеродистая сталь – низколегированная сталь» /А.П. Ильин, О.Б. Назаренко, С.В. Рихерт //

Известия Томского политехнического университета, - 2004. - Т. 307, - № 3. - С.77-79. 7. Салахутдинов И. Р. Повышение износостойкости гильз цилиндров бензиновых двигателей биметаллизацией рабочей поверхности трения /И.Р. Салахутдинов, А.Хохлов // Молодежный инновационный форум Приволжского федерального округа. Конкурс научно-технического творчества молодежи (НТТМ), Ульяновск, 2015 г. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://ify.ulstu.ru>. 8. Парсаданов И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия: Монография/Парсаданов И.В. - Харьков НТУ «ХПИ». - 2003. - 244 с.

#### **Bibliography (transliterated)**

1. Fenomenologicheskij podhod. Tehnicheskij slovar' [Phenomenological approach. Technical dictionary], available at: <http://www.ai08.org>. 2. Levanov, I.G., Muhotrov, I.V. (2012), "Jeksperimental'nye issledovanija tribosopryazhenija "porshnevoe kol'co-cilindr"" [Experimental researches of interface] piston ring-cylinder", Dvigateli vnutrennego sgoranija, №2, pp. 64-66. 3. Zagajko, S.A., (2013), "Matematicheskoe modelirovanie iznashivaniya detalej CPG DVS" [Mathematical design of wear of details of CPG ICE], Ufa:UGATU, №3, pp. 231-238. 4. Mykosyanchyk, O.O., Mnatsakanov, R.H., Khimko, M.S. (2015), "Modelyuvannya intensyvnosti znoshuvannya hil'zy tsilindra dvyhuna vnutrishn'oho z'horyannya" [Design of intensity of wear of shell of cylinder engine of internal combustion], Problemy tertya ta znoshuvannya, 1(65), pp.140-145. 5. Krageľskij, I. V., Dobychin, M. N., Komalov, V. S., (1977), "Osnovy raschetov na trenie i iznos" [Bases of calculations on a friction and wear], M., Mashinostroenie, pp. 526. 6. Il'in, A. P., Nazarenko, O.B., Rihert, S.V. (2004), "Vlijanie suspenzii "motornoe maslo + smes' nanoporoshkov medi i nikelja" na tribologicheskie svojstva pary trenija "uglerodistaja stal" – nizkolegirovannaja stal"" [Influence of suspension "motor oil + mixture of nanopowders of copper and nickel" on tribology properties of pair of friction "carbon steel is low-alloy steel"], Izvestija Tomskogo politehnicheskogo univer-siteta, T. 307, № 3, pp. 77-79. 7. Salahutdinov, I.R., (2015), "Povyshenie iznosostojkosti gil'z cilindrov benzinovyh dvigatelej bimetallizacij rabochej poverhnosti trenija" [Increase of wearproofness of shells of cylinders of petrol engines of by double metallization of working surface of friction], available at: <http://ify.ulstu.ru>. 8. Parsadanov, I. (2003), "Povyshenie kachestva i konkurentosposobnosti dizeliv na osnove kompleksnogo toplivno-jekologicheskogo kriterija: Monografija" [Upgrading and competitiveness of diesels on the basis of complex fuel-ecological criterion: Monograph], Har'kov NTU «HPI», 244 p.

*Поступила в редакцию 18.05.2016*

**Кубич Вадим Иванович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автомобилей, Запорожский национальный технический университет, Украина, e-mail: [reibung1@mail.ru](mailto:reibung1@mail.ru), (061) 7642647

**Юдиценко Артем Викторович** – студент 4 курса кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» транспортного факультета Запорожского национального технического университета, Украина, e-mail: [artemv123@yandex.ru](mailto:artemv123@yandex.ru), (061) 7698241

**Блощинская Наталия Викторовна** – студентка 4 курса кафедры «Программных средств» факультета компьютерных наук и технологий Запорожского национального технического университета, Украина, e-mail: [lovelykira@gmail.com](mailto:lovelykira@gmail.com), (061) 7643361

### **ФЕНОМЕНОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ТРИБОЛОГІЧНОГО СТАНУ СПРЯЖЕНЬ ЦПГ ДВЗ**

**В.І. Кубіч, А.В. Юдіценко, Н.В. Блощинська**

Розглянуто підходи до оцінки позначених параметрів трибологічного стану контакту поверхонь в з'єднаннях «поршневі кільця - гільза циліндра», «поверхня поршня - гільза циліндра» в початковий момент руху і малих переміщеннях з використанням експлуатаційних натурних елементів конструкції на обладнанні машини СМЦ-2. При цьому мікропро-

цеси, що відбуваються на границі приповерхневих шарів матеріалів трибологічних систем, розглядаються як феномен. Представлені розширені можливості розробленого програмного продукту з моделювання тепломеханічного навантаження контакту «гільза циліндра - поршневе кільце», що дозволяють виконувати оцінку діаметрального зносу гільзи циліндра на прогнозованому напрацюванні ДВЗ.

## **PHENOMENOLOGICAL APPROACH TO TRIBOLOGICAL PAIRING STATUS ASSESSMENT CPG ICE**

**V.I. Kubich, A.V. Yuditsenko, N.V. Bloschinskaya**

The approaches to the assessment of the state of the designated parameters of tribological contact surfaces mates' piston ring - cylinder liner ", " piston - cylinder liner "in the initial moment of movement and small movements with the use of full-scale operational design elements on the equipment of the machine SMC-2. In this micro-processes that occur at the boundary surface layers of tribological systems, materials, considered as a phenomenon. Presented developed advanced software for modeling of thermal and mechanical loading contact "cylinder liner - piston ring" that enable you to estimate the diametrical wear of the cylinder liner to the target operating time of the internal combustion engine.

**Ключевые слова:** коэффициент трения, смазочные образования, моделирование, интенсивность изнашивания, диаметральный износ

**Ключові слова:** коефіцієнт тертя, мастильні утворення, моделювання, інтенсивність зношування, діаметральний знос

**Keywords:** coefficient of friction, lubrication education, simulation, wear rate, diametrical wear