

В.В. Аулин

Кировоградский национальный технический университет

Изменение режимов трения в сопряжениях цилиндро-поршневой группы дизелей при физико-химическом модифицировании моторного масла

Аннотация. Показана возможность управления режимами трения физико-химическим модифицированием моторного масла добавлением присадки и обработкой электрическим или магнитным полем. Изменение режима трения определены по экспериментально установленной зависимости электрического сопротивления слоя масла от значений критерия Зоммерфельда, используя диаграмму Герси-Штрибека. Выявлены диапазоны изменения коэффициентов трения на различных режимах в сопряжениях ЦПГ с модифицированным моторным маслом и получены результаты изменения электрического сопротивления слоя масла в них. Исследована зависимость электрического сопротивления в сопряжениях двигателя от угла поворота коленчатого вала и определен, при этом, характер изменения режима трения.

Ключевые слова: моторное масло, присадка, физическое поле, режим трения, физико-химическое модифицирование, ЦПГ.

V. V. Aulin

Kirovograd national technical university

Changing of friction conditions in cylinder-piston pairings of diesels at the physicochemical modification of the engine oil

Annotation. The possibility of controlling of friction mode of physical and chemical modification of the engine oil by adding additives and processing electrical or magnetic field is shown. Changing the friction mode from experimentally established dependence of the electrical resistance of the layer of oil on the values of the criterion Sommerfeld, using Gersey-Stribeck diagram, is determined. Ranges of friction coefficients for different modes in pairings of CPG with modified engine oil are identified and the results of change in electrical resistance of the layer of oil in them are obtained. The dependence of the electrical resistance in the engine pairings from the crank rotation angle is defined and, thus, change the conditions of friction is determined.

Keywords: motor oil, additive, physical field, conditions friction, physicochemical modification, CPG.

УДК 621.891:631.31

В.В. Аулин, канд. физ.-мат. наук

(Кировоградский национальный технический университет, Кировоград, Украина)

Изменение режимов трения в сопряжениях цилиндро-поршневой группы дизелей при физико-химическом модифицировании моторного масла

В сопряжениях деталей со смазочными материалами, можно выделить три основных режима трения: гидродинамический, смешанный и граничный [1, 2]. Гидродинамический режим характеризуется наличием сплошной пленки масла между сопряженными поверхностями деталей, толщина которой превышает суммарную высоту их шероховатостей. Режим является наиболее благоприятным: износ деталей практически отсутствует, а трение незначительно из-за взаимодействия легкосдвигаемых слоев масла. В то время сила гидродинамического трения может быть достаточно высокой при существенном увеличении относительной скорости движения деталей, площади их рабочих поверхностей, вязкости масла и т.п. Смешанный режим трения возникает при критическом уменьшении толщины пленки масла, что приводит к появлению участков непосредственного контакта поверхностей деталей. Трение при этом сопровождается незначительным износом поверхностей деталей в местах контакта. Граничный режим определяется трением в тонких поверхностных слоях деталей, интенсивность которого зависит от соотношения прочности граничных слоев на срез-разрыв, а также от характера изменения прочности по глубине материала и создания положительного градиента механических свойств.

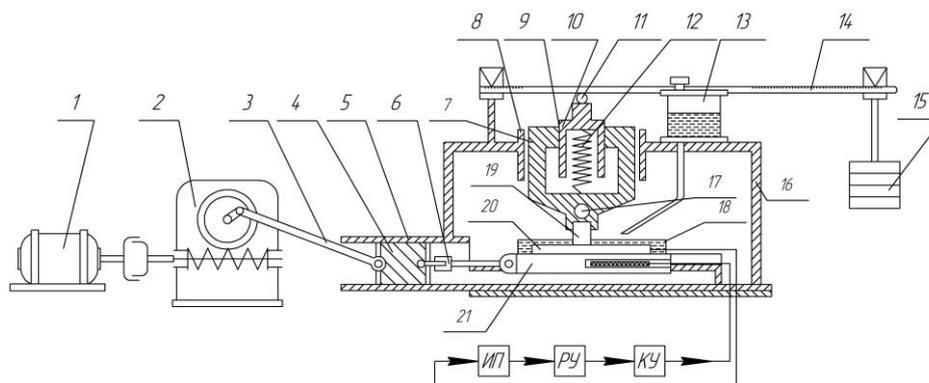
Исследования режимов трения сопряжений дизелей мобильной сельскохозяйственной и транспортной техники [3, 4] свидетельствуют, что в сопряжении "поршневое кольцо-гильза цилиндра" наблюдается преимущественно граничное трение

(60...70 % от времени рабочего цикла) и в меньшей степени смешанное и гидродинамическое (30...40 %). Трения в сопряжении "поршень-гильза цилиндр" имеет, наоборот, преимущественно гидродинамический характер (70...80 %), переходящий в смешанное и граничное трение (20...30 %). Подшипники КШМ работают в основном в режиме гидродинамического трения (90 %), который переходит в смешанный и граничный режимы трения (10 %) в моменты пуск-остановки и максимальной нагрузки двигателя. Изменение режима трения существенно влияет на износ рабочих поверхностей сопряженных деталей, технико-экономические показатели и ресурс двигателя в целом.

Целью данной работы является изучение влияния физико-химического модифицирования моторного масла на режим трения в основных сопряжениях дизеля.

Методика экспериментальных исследований

Исследования режимов трения в сопряжении образцов гильз цилиндров и поршневых колец проводили на установке, состоящей из модернизированной машины трения 77МТ-1 и устройств автоматизированного управления нагрузкой и фиксирования результатов. Установка позволяет смоделировать работу трибосопряжения "гильза цилиндра-поршневое кольцо" двигателя. Условия работы сопряжений образцов наиболее приближенные к реальным. Модернизированная машина трения 77МТ-1 дает возможность изучать динамику процессов трения и износа, выявлять режимы трения, определять триботехнические характеристики. Схема установки приведена на рис. 1.



а)

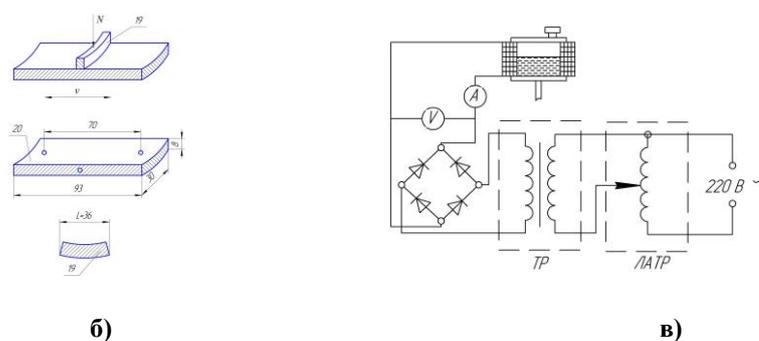


Рис. 1. Схема установки для исследования процессов трения и износа в сопряжении "гильза цилиндра-поршневое кольцо": модернизированная машина трения 77 МТ-1 (а); образцы и их размеры (б); схема обработки масла электрическим и магнитным полем (в): 1 – электродвигатель; 2 – червячный редуктор; 3 – шатун; 4 – шток соединяющий редуктор с узлом трения; 5 – отрезок трубы; 6 – шток соединений с салазками; 7 – нижняя часть стакана; 8 – направляющая корпуса; 9 – штифт; 10 – верхняя втулка; 11 – стальной шарик; 12 – пружина на корпусе стакана; 13 – устройство для модификации масла; 14 – рычажное устройство; 15 – устройство нагружения; 16 – корпус установки; 17 – нагревательная печь; 18 – масляная ванна; 19 – образец; 20 – образец гильзы цилиндра; 21 – направляющие полоза; ИП – измерительные приборы; РУ, КУ – регулирующее и контролирующее устройства

Испытания образцов проводили в течение 10 часов. В качестве смазочного среды использовали базовые М-10Г₂к, М-10ДМ и композиционные масла с различной концентрацией присадки глицерата меди $\text{Cu}_3(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2$ от 0,1 до 6,0 % объемного содержания. При физико-химическом модифицировании масла его обработку осуществляли электрическим поля (ЭП) диапазоне напряженностей $E_э = (0,5...5,0) \cdot 10^6$ В/м, и магнитного поля – (МП) $H_m = (1,0...4,0) \cdot 10^3$ А/м.

Заданная температура в зоне режим трения сопряжения образцов поддерживался автоматической подачей сигнала с медно-константановой термопары, установленной в отверстии под поверхностью трения образца гильзы, на измерительные приборы (ИП) с регулирующим устройством (РУ), через контролирующее устройство (КУ).

Испытанию подлежали образцы из чугуна СЧ-18, вырезанные из гильз цилиндров и поршневых колец дизелей серии ЯМЗ и КамАЗ. Режим возвратно-поступательного движения образцов характеризовался параметрами: нагрузка – $p = 1,0...16,0$ МПа;

скорость образца "гильза" – $v = 0,5...10,0$ м/с.

Для определения режимов трения на модернизированной установке измеряли величину расхода мощности на трение с помощью измерительной части и сравнивали ее с мощностью в режиме без нагрузки.

Электропроводность слоя базового и модифицированного масла, находящегося между поверхностями трения сопряжения "гильза цилиндра-поршневое кольцо", оценивали с помощью кондуктометра ОК 102/1.

Исследование режимов проводили и на одноцилиндровой установке, изготовленной из одной секции дизеля (рис. 2).

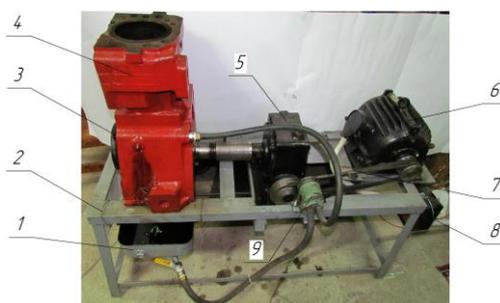


Рис. 2. Общий вид одноцилиндровой установки для изучения процессов трения и износа основных сопряжений деталей: 1 – поддон с маслом; 2 – рама; 3 – манометр; 4 – одноцилиндровый отсек; 5 – редуктор; 6 – электродвигатель с фазным ротором; 7 – клиноременной передачи; 8 – пульт управления; 9 – масляный насос

Частоту вращения коленчатого вала регулировали электродвигателем с фазным ротором изменением сопротивления переменных реостатов в цепи ротора. Электрическая схема подключения источника тока к установке и модифицирования масла приведена на рис. 3.

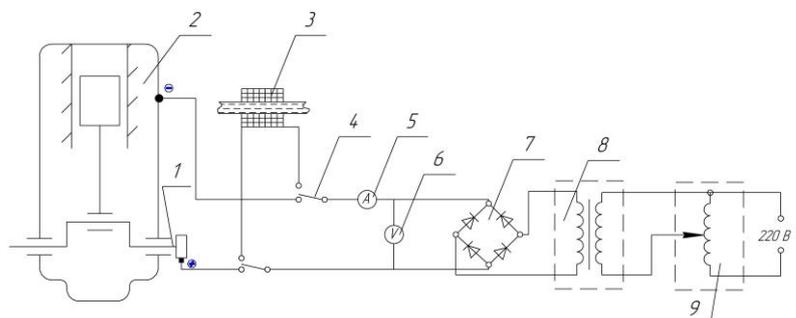


Рис. 3. Схема подключения источника тока и модифицирования моторного масла: 1 – токосъёмник; 2 – одноцилиндровая установка; 3 – активатор; 4 – переключатель; 5 – амперметр; 6 – вольтметр; 7 – выпрямитель тока; 8 – понижающий трансформатор; 9 – регулятор напряжения

При подаче электрического тока использовали подпружиненную меднографитовую щетку и замыкание на массу корпуса установки. Силу тока в цепи регулировали с помощью лабораторного трансформатора.

Изменение режима трения на одноцилиндровой установке и его влияние на приработку деталей ЦПГ определяли по изменению силы тока и напряжения мощности и электрического сопротивления моторного масла. Для этого был использован экспериментальный образец поршня (рис. 4) [4].

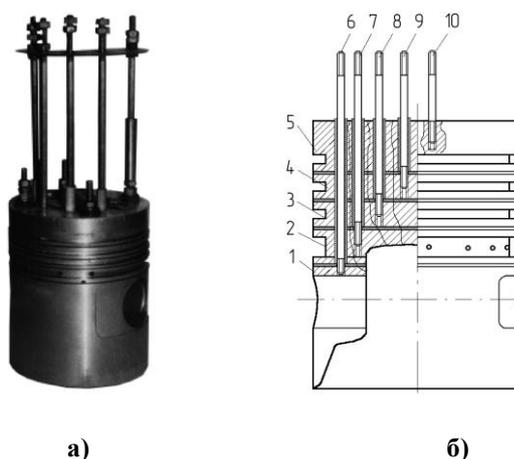


Рис.4. Общий вид экспериментального поршня (а) и схема сопряжений ЦПГ (б): 1 – гильза цилиндра-поршень; 2 – гильза цилиндра-маслосъемное кольцо; 3 – гильза цилиндра-нижнее компрессионное кольцо; 4 – гильза цилиндра-среднее компрессионное кольцо; 5 – гильза цилиндра-верхнее компрессионное кольцо; 6-10 – контактные стержни секций

Заметим, что части поршня изолированы друг от друга и к каждой из них подводился контактный провод – стержень. Для жесткости конструкции стержни над головкой поршня его фиксировали текстолитовой пластинкой. С целью сохранения условий смазки деталей ЦПГ на поршень устанавливали все кольца. После сборки шатунно-поршневую группу смазывали маслом и устанавливали в гильзу цилиндров

установки, предварительно смазанную маслом.

Электрическая схема подключения экспериментального поршня наведена на рис. 5.

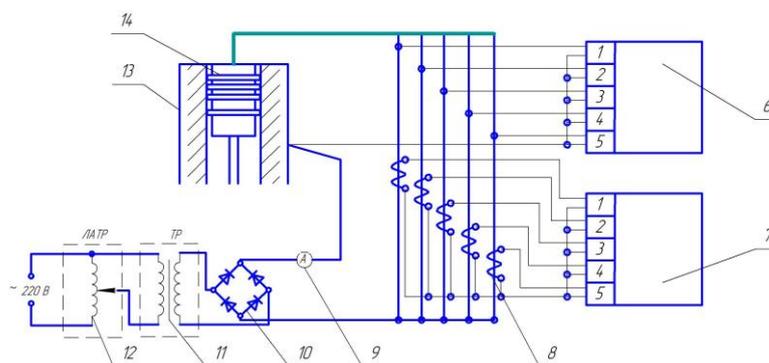


Рис. 5. Схема подключения источника тока и осциллографов к деталям ЦПГ: 1-5 – каналы самописцев; 6 и 7 – осциллографы НЗ27-5; 8 – трансформаторы тока; 9 – амперметр Э514; 10 – выпрямитель тока; 11 – понижающий трансформатор ТС-1,5/0,5; 12 – регулятор напряжения РНО-10-250; 13 – блок установки; 14 – поршень в сборе

Применением шатуна с текстолитовой втулкой, поршень электрически изолировали от коленчатого вала. Изменение режима трения и его влияние на приработку сопряжений ЦПГ фиксировали по изменению силы тока и напряжения, которые записывали пятиканальным осциллографом НЗ27-5 и обрабатывали полученные осциллограммы. Используя закон Ома, определяли характер изменения сопротивления слоя масла в исследуемых сопряжениях за один оборот коленчатого вала.

Источником однофазного синусоидального тока служил регулятор напряжения РНО-10- 250 и понижающий трансформатор ТС-1,5/0,5. При включении источника тока по амперметру выставляли ток 2 А, после чего сразу включали привод коленчатого вала. После установки частоты вращения коленчатого вала $n = 2 \text{ с}^{-1}$, в течение пяти секунд проводили осциллографирование процесса, затем увеличивали силу тока и снова проводили осциллографирование и т.д. Общее время одного опыта составляло 110 с. Полученные данные позволили построить динамику изменения электрического сопротивления сопряжений и определить промежутки времени реализации того или иного режима трения.

Результаты экспериментальных исследований

Характер трения рабочих поверхностей деталей сопряжений и режим смазки определяются как количеством смазочного материала и его вязкостью, так и условиями работы трибосопряжений. Исходя из гидротермодинамической теории смазки, толщину пленки масла в сопряжении "гильза цилиндра-поршневое кольцо" можно оценить по формуле [5]:

$$h = \sqrt{\frac{\eta \cdot v \cdot b}{\bar{p}_{\text{ск}}}} = b \sqrt{S_0}, \quad (1)$$

где η , h – динамическая вязкость и толщина смазочного материала; b – высота поршневого кольца; $\bar{p}_{\text{ск}}$ и v – давление кольца на гильзу цилиндра и скорость перемещения поршня; S_0 – значение критерия Зоммерфельда.

При этом электрическое сопротивление слоя масла и коэффициент трения определяется соотношением:

$$R = \frac{b \cdot \sqrt{S_0}}{\chi \cdot S_{\delta}}; \quad f_{\text{мп}} = \frac{\eta \cdot v}{\bar{p}_{\text{ск}} \cdot b \cdot \sqrt{S_0}}, \quad (2)$$

где χ – удельная электропроводность масла, $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$; S_{δ} – площадь боковой поверхности кольца, м^2 .

Результаты измерений электрического сопротивления слоя масла в сопряжении образцов на машине трения 77МТ-1 дали возможность построить зависимость этой величины от значения критерия Зоммерфельда (рис. 6).

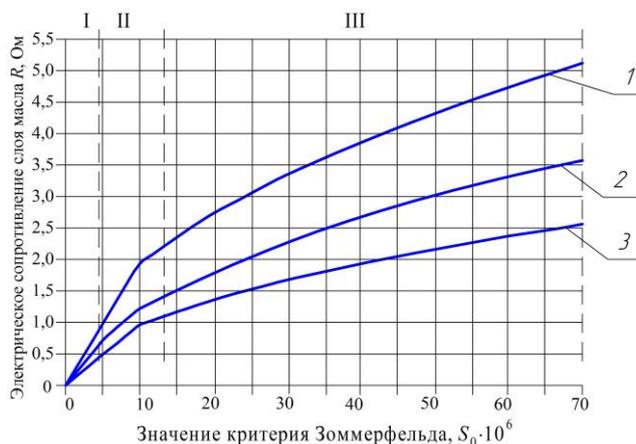


Рис. 6. Зависимость электрического сопротивления моторного масла от критерия Зоммерфельда: 1 – базовое масло; 2 – композиционное масло модифицированное ЭП ($E_s = 1,25 \cdot 10^6$ В/м); 3 – композиционное масло модифицированное МП ($H_m = 2,5 \cdot 10^4$ А/м); зоны трения: I – предельное; II – смешанное; III – гидродинамическое

Можно видеть, что каждому значению критерия Зоммерфельда соответствует определенное значение электрического сопротивления. Физико-химическое модифицирование масла уменьшает электрическое сопротивление в сравнении с базовым.

С учетом результатов, представленных на рис. 6, и соотношений (2), были построены кривые Герси-Штрибека, по которым определен характер изменения коэффициентов трения при использовании модифицированного масла: в гидродинамическом режиме, при обработке ЭП – уменьшается с 0,009 до 0,006, а при обработке МП – с 0,009 до 0,004, т.е. в 1,9...2,3 раза; в смешанном режиме при обработке ЭП – с 0,017 до 0,015, при обработке МП с 0,017 до 0,013, т.е. в 1,10...1,3 раза; в граничном, при обработке ЭП и МП – с 0,140 до 0,080, т.е. в 1,5...1,8 раза. Максимальное снижение коэффициента трения в граничном режиме наблюдали при введении в моторное масло присадки глицерата меди концентрацией ($c_v = 4\%$) и обработке ЭП напряженностью $E_s = 1,25 \cdot 10^6$ В/м и МП напряженностью $H_m = 2,5 \cdot 10^4$ А/м.

Оценки критерия Зоммерфельда, учитывающие скорость поршня, как функцию поворота коленчатого вала [5], с измерением электрического сопротивления и фиксацией различных режимов трения представлены на (рис. 7).

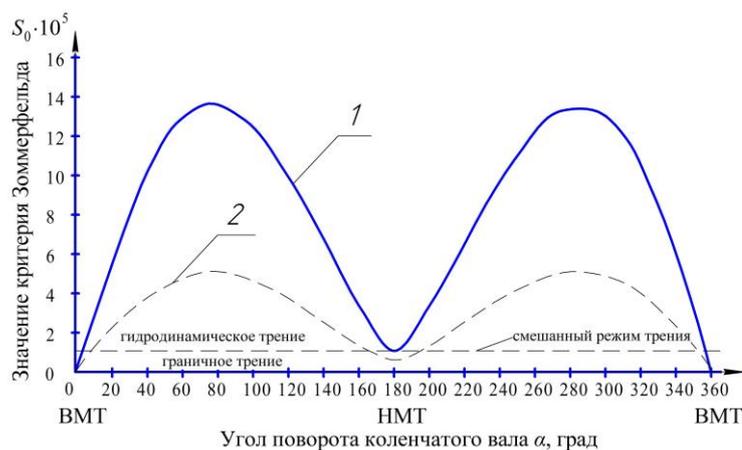


Рис. 7. Изменение режимов трения в сопряжении "гильза цилиндра-поршневое кольцо" в зависимости от угла поворота коленчатого вала за один двойной ход поршня на одноцилиндровой установке при использовании модифицированного (1) и базового (2) моторных масел

Выявлено, что условия граничного режима трения наблюдаются для поршневых колец при положениях в ВМТ и НМТ, где скорость поршня минимальна. Граничный режим трения фиксировали при угле поворота коленчатого вала: $0,01^\circ$; $179,99^\circ$; $180,01^\circ$ и $359,99^\circ$. При этом не исключено наличие механического контакта сопряженных деталей в пределах углов поворота коленчатого вала: $0...0,01^\circ$; $179,99...180,01^\circ$; $359,99...360^\circ$.

Гидродинамическая смазка наблюдается при углах поворота коленчатого вала: $3,37...174,02^\circ$; $185,98...356,63^\circ$. Фиксировали существенное увеличение доли гидродинамического режима трения в области угла 45° и частотах вращения коленчатого вала до $3,33 \text{ с}^{-1}$. Результаты измерений сопротивления масла в зазоре сопряжений ЦПГ при помощи экспериментального поршня приведены на рис. 8.

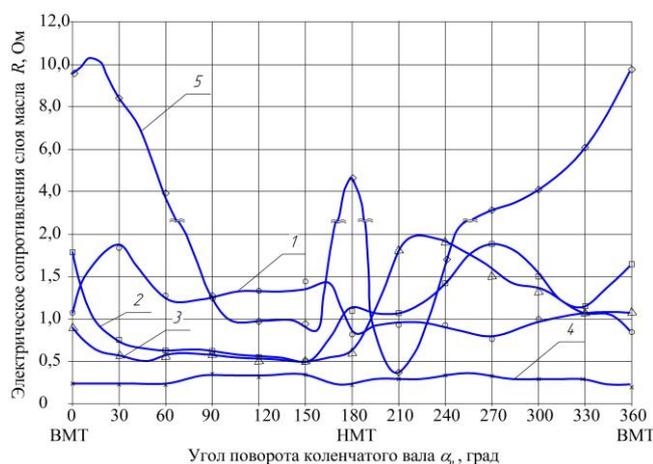


Рис. 8. Изменение сопротивления слоя композиционного ($c_v=4\%$) масла, обработанного МП ($H_m = 2,5 \cdot 10^4 \text{ А/м}$), в сопряжениях ЦПГ в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n = 3,33 \text{ с}^{-1}$, $R_{\text{max}} = 2,1 \text{ мкм}$): 1 – сопряжения "верхнее компрессионное кольцо-гильза цилиндра", 2 – сопряжения "среднее компрессионное кольцо-гильза цилиндра", 3 – сопряжения "нижнее компрессионное кольцо-гильза цилиндра", 4 – сопряжение "маслосъемное кольцо-гильза цилиндра", 5 – сопряжения "поршень-гильза цилиндра"

Исследованиями установлено, что наибольшее электрическое сопротивление слоя масла наблюдается в сопряжении "поршень-гильза цилиндра", особенно в районе ВМТ и НМТ (рис. 8, кривая 5). При движении поршня вниз от ВМТ, после достижения им максимальной скорости в пределах угла поворота коленчатого вала от 90° до 163° наблюдается значительное уменьшение электрического сопротивления слоя масла. Такая же закономерность наблюдается и при движении поршня вверх от НМТ после его перекадки в пределах угла поворота коленчатого вала от 198° в 224° . Изменение электрического сопротивления слоя масла по сопряжениям 1...4 имеет различный характер и зависит от угла поворота коленчатого вала.

При движении поршня от ВМТ к НМТ максимальное электрическое сопротивление слоя масла зафиксировано в сопряжениях "верхнее компрессионное кольцо-гильза цилиндра" (рис. 8, кривая 1). Несколько меньшее значение сопротивления слоя масла соответствуют сопряжениям "среднее компрессионное кольцо-гильза цилиндра" и "нижнее компрессионное кольцо-гильза цилиндра" (рис. 8, кривая 2,3). Наименьший электрический сопротивление слоя масла – в сопряжениях "маслосъемное кольцо-гильза цилиндра", которое практически является постоянным неизменным при изменении угла поворота коленчатого вала (рис. 8, кривая 4).

Результаты свидетельствуют о наличии отдельного слоя масла в сопряжении ЦПГ при движении поршня от НМТ к ВМТ. Этому способствует не только скоростной режим, но и наличие слоя масла над поршнем, на который набегало верхнее компрессионное кольцо при движении с НМТ к ВМТ. Относительно других колец, то вероятно при движении поршня от ВМТ к НМТ маслосъемные кольца и нижние кольца, имея обратную конусность снимали масло со стенок гильзы цилиндра, что ослабляло условия гидродинамического смазывания (рис. 8, кривые 2, 3 и 4).

Полученные данные свидетельствуют о том, что за двойной ход поршня исследуемые поверхности взаимодействуют при различных режимах трения: граничном,

смешанном и гидродинамическом. Режим граничного трения способствует активированию поверхностей присадкой глицерата меди, усиливает эффект уменьшения коэффициента трения и потерь мощности. При режиме гидродинамического трения участка поршневого кольца, прилегающего к рабочей поверхности гильзы цилиндра, отделяются от нее тонким слоем масла. Толщина этого слоя значительно меньше, чем на непрлегающих участках, поэтому влияние обработки масла ЭП и МП наблюдается на них более интенсивно, вследствие меньшего электрического сопротивления слоя модифицированного композиционного масла. Попадая затем в зоны смешанного и граничного трения, прилегающие к гильзе цилиндра участки, активизируются механическим и физико-химическим способом.

Обращает на себя внимание полученная зависимость коэффициента трения от угла поворота коленчатого вала (рис.9) на одноцилиндровой установке.

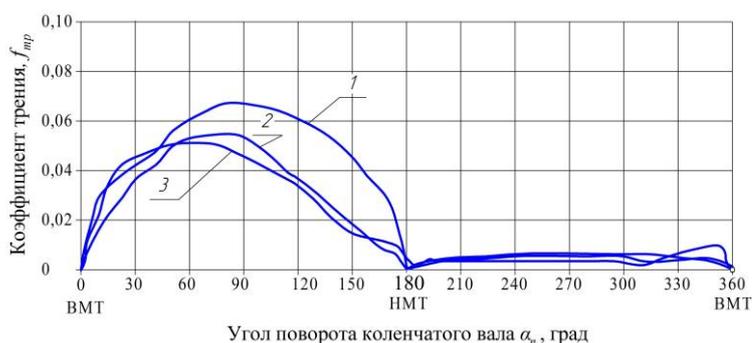


Рис. 9. Зависимость коэффициента трения в трибосопряжении "гильза цилиндра-поршневое кольцо" ($n_{кв} = 2 \text{ с}^{-1}$) от угла поворота коленчатого вала для базового (1) и модифицированного присадкой глицерата меди ($c_v=4\%$) и обработкой ЭП ($E_s = 1,25 \cdot 10^6 \text{ В/м}$) (2) и МП ($H_M = 2,5 \cdot 10^4 \text{ А/м}$) (3) моторного масла

Рост суммарной нагрузки делает невозможным поддержание необходимой толщины клина пленки моторного масла материала и в исследуемом сопряжении реализуется режим граничного трения с коэффициентами трения в пределах 0,05...0,07. Существенное повышение значения коэффициента трения наблюдается в области 75° и 90° угла поворота коленчатого вала и дальнейшее его снижение на интервале углов

поворота 180° ... 360° . Это объясняется наличием слоя масла над поршнем одноцилиндровой установки и скоростными режимами его движения, позволяющее выйти на гидродинамический режим трения.

Выводы

Анализ результатов исследований режимов трения в сопряжениях деталей ЦПГ с использованием диаграммы Герси-Штрибека и измерений электрического свидетельствует о том, что для обеспечения оптимального режима трения необходимо, чтобы критерий Зоммерфельда изменялся в диапазоне: $[5;30] \cdot 10^{-5}$.

Условия работы сопряжений ЦПГ, их режимы трения определяются не только давлением, относительной скоростью движения поршня, угла поворота коленчатого вала, температурой в зоне трения, но и способом модифицирования масла добавлением присадки и обработкой электрическим или магнитным полем.

Библиографический список

1. Погодаев Л.И. Материалы. Пары трения ДВС. Смазочные композиции / Л.И. Погодаев, В.Н. Кузьмин, П.П. Дудко // С-Пб.: Академия транспорта Российской Федерации, 2001. – 304 с.
2. Путинцев С.В. Результаты триботехнических испытаний смазочных композиций для ДВС / С.В. Путинцев, Р.А. Галата, В.И. Беклемышев // Известия вузов. Машиностроение. – 2000. – №3. – С. 51-56.
3. Александров Е.Е. Повышение ресурса технических систем путём использования электрических и магнитных полей: монография / Е.Е. Александров, И.А. Кравец, Е.П. Лысиков и др. – Х.: НТУ "ХПИ", 2006. – 544 с.
4. Аулін В.В. Вплив режимів тертя в основних сполученнях деталей на механічні втрати в ДВЗ / В.В. Аулін, С.В. Лисенко, О.В. Кузик // Вісник інженерної академії України. – 2011. – №2. – С. 200-204.
5. Аулін В.В. Теоретичне обґрунтування зміни режимів тертя в циліндро-

поршневій групі ДВЗ / В.В. Аулін, С.В. Лисенко, О.В. Кузик // Проблеми трибології
(Problems of tribology). Хмельницький. ХНУ, 2010.-№3- С.46-54.