

В. Г. Заренбин, Н.И. Мищенко, В.В. Богомолов

К РАСЧЕТУ НА ЗАЕДАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ЦПГ ДВС

Предложен метод расчета на заедание деталей цилиндро-поршневой группы двигателя внутреннего сгорания, учитывающий теплофизические и временные факторы в зоне контакта при неустановившемся характере трения. Предложенная методика предусматривает расчет в два этапа: расчет максимальной температуры на контакте и расчет времени, за которое на микровыступе может восстанавливаться адсорбционный слой. Результаты расчета дают возможность теоретической оценки вероятности появления задира в паре трения поршневое кольцо-гильза цилиндра ДВС в условиях повторно-кратковременного режима трения.

Проблема. Проблема задира с последующим катастрофическим износом узлов трения ряда машин, возникающая при постоянном стремлении к их высоким удельным массогабаритным показателям и интенсификации рабочих процессов, становится все более актуальной.

При проектировании, изготовлении и эксплуатации машин принимаются все меры к повышению сопротивляемости деталей к задиру путем правильного выбора материалов и методов их обработки, оптимизации конструкции, совершенствования приработки, создания гидродинамического режима смазки, улучшения ее противозадирных свойств. Всему этому способствует наличие достаточно надежных расчетно-теоретических методов оценки противозадирной стойкости деталей, обеспечивающих требуемую работоспособность узлов трения. Общепризнанным направлением дальнейшего развития таких методов расчета является комплексный учет влияния механических, тепловых и кинематических факторов.

В работах [2, 3] приведены критериальные зависимости для оценки противозадирной стойкости трущихся тел, однако в них отсутствуют сведения по расчету параметров комплексов, применительно к условиям трения и режимам работы деталей двигателей внутреннего сгорания. Например, формулы по определению контактных температур, характеристик множественного контакта и т.д.

Цель работы. Разработать термовременной метод расчета на заедание деталей ДВС, учитывающий теплофизические и временные факторы в зоне контакта при неустановившемся характере трения.

Основной материал. Известно [1], что под заеданием принято понимать процесс возникновения и развития повреждения поверхности трения вследствие схватывания и переноса материала. Реализация заедания при граничной смазке происходит в такой последовательности [3, 4]. В начале на части поверхности контакта трущихся тел разрушается граничный слой с образованием адгезионных связей между контактирующими поверхно-

стями. Разрушение этих связей при относительном перемещении тел приводит или к умеренному адгезионному изнашиванию (микросхватывание), или, при достижении критического числа адгезионных связей с учетом свойств контактирующих тел, к схватыванию двух поверхностей по всей площади номинального контакта, которое сопровождается вырывами и задирами поверхностей.

Если в процессе скольжения участки поверхности, на которых произошло разрушение граничного слоя, будут успевать пассивироваться, т.е. покрываться адсорбированной пленкой смазочной среды при заданной скорости скольжения, то число участков не будет лавинообразно возрастать и схватывание контактирующих поверхностей не произойдет («самозалечивание» участков).

Скорость, с которой образуется граничный смазочный слой на поверхности определяется температурой, нормальной нагрузкой и временем действия смазочной среды.

С учетом изложенного принимаем следующую расчетную модель:

1. При фрикционном взаимодействии шероховатых поверхностей каждый микровыступ испытывает циклическое воздействие со стороны микровыступа контртела (множественный контакт).

2. Максимальная температура на фактическом пятне контакта рассматривается как сумма средней поверхностной температуры $t_{\text{п}}$ и температурной вспышки t_j в условиях неустановившегося трения.

3. Учет влияния пленки масла на температуру в контакте осуществляется с помощью приведенных теплофизических характеристик.

4. Доля тепла, идущая в каждое из контактирующих тел, находится из равенства максимальных или средних поверхностных температур соприкасающихся поверхностей.

5. Повышение температуры фрикционного контакта не вызывает дополнительных напряжений и деформаций в зоне контакта.

Представленная схема предусматривает проведение расчетов последовательно в два этапа:

1. Расчет максимальной температуры на кон-

также t_{max} и проверка выполнения необходимого условия заедания $t_{max} \geq t_{кр} / n_3$, где $t_{кр}$ – критическая температура заедания, найденная экспериментальным путем при заданных условиях трения; n_3 – коэффициент запаса надежности против заедания, зависящий от конструктивных особенностей, свойств контактируемых материалов, режимов работы, погрешности расчетов и других факторов.

2. Расчет времени τ_{ad} , за которое на микровыступе может восстанавливаться адсорбционный слой при его движении между пятнами контакта, и проверка выполнения достаточного условия заедания $\tau_{ad} \leq [\tau]$, где $[\tau]$ – время, достаточное для образования адсорбционного слоя на участках контактирующих поверхностей с разрушенным граничным слоем.

Выполнение двух условий приводит к схватыванию и в дальнейшем к задиру, выполнение только первого условия – к образованию отдельных участков микросхватывания и умеренному адгези-

онному изнашиванию.

Максимальная температура в трибосопрежении поршневое кольцо (ПК) – гильза цилиндра (ГЦ) ДВС при множественном контакте и неустановившемся трении, определяется согласно расчетной схеме (рис. 1) по формулам [5]:

$$t_{max} = t_n + t_j,$$

$$t_{j,min} = \frac{q_k d_c}{2} \sum_{j=1}^N \frac{\alpha_{тп,j}}{\lambda_{пп,j}} [\theta(Fo1_j) - \theta(Fo2_j)], \quad (1)$$

$$t_{j,max} = t_{j,min} + \frac{2\alpha_{тп} q_k}{\sqrt{\pi} \cdot \lambda_m} \sqrt{\alpha_m \tau_m}, \quad (2)$$

$$\tau_m = \delta_m^2 / (3a_m),$$

где $\theta(Fo) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{2\sqrt{Fo}} \text{erf}^2\left(\frac{1}{u}\right) du$,

$\theta(Fo1_j), \theta(Fo2_j)$ – функции при значениях критерия Fo , соответственно

$$Fo1_j = a_{пп,j} \cdot j\tau_n / d_c^2, \quad Fo2_j = a_{пп,j} \cdot (j\tau_n - \tau_k) / d_c^2;$$

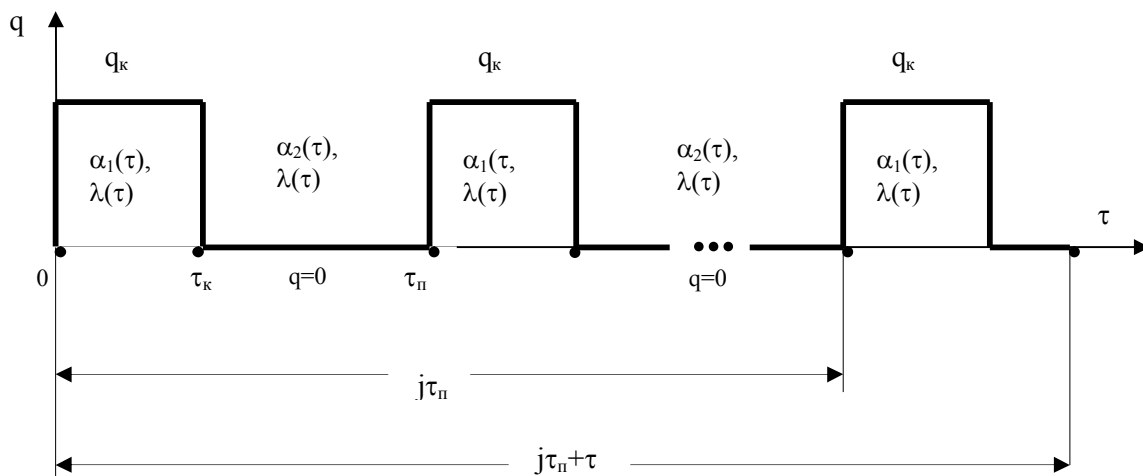


Рис. 1. Расчетная схема теплового взаимодействия неровностей при множественном контакте

τ_n – промежуток времени между двумя последовательными контактами; τ_k – длительность контакта; d_c – средний диаметр пятна контакта; $a_{пп,j}, \lambda_{пп,j}$ – приведенные коэффициенты температуропроводности и теплопроводности за время действия теплового потока (ТП) соответствующего Fo_j ; [5]; a_m, λ_m – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности масляной пленки (МП); δ_m – толщина МП; q_k – интенсивность теплового потока; $\alpha_{тп,j}$ – коэффициент распределения теплового потока; N – число циклов нагружения.

При малых значениях критерия Фурье ($Fo < 0,1$) формулу (1) можно упростить

$$t_{j,min} = \frac{2q_k}{\sqrt{\pi}} \sum_{j=1}^N \alpha_{тп,j} \left[\frac{\sqrt{a_{пп,j} \cdot j\tau_n} - \sqrt{a_{пп,j} (j\tau_n - \tau_k)}}{\lambda_{пп,j}} \right]. \quad (3)$$

При $\lambda_{пп,j} = \lambda_n; a_{пп,j} = a_n$:

$$t_{min,j} = \frac{2\alpha_{тп} q_k}{\lambda_n} \left(\frac{a_n}{\pi} \right)^{0,5} \sum_{j=1}^N (\sqrt{j\tau_n} - \sqrt{j\tau_n - \tau_k}),$$

что совпадает с выражением, приведенным в работе [6].

Время охлаждения микровыступа рассчитывается как

$$\tau_{ad} = \frac{s - d_{cp}}{V_{ск}},$$

где s – среднее расстояние между пятнами контакта [7, 9]; $V_{ск}$ – скорость скольжения ПК.

Для упругого контакта [6, 8]

$$s_y = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot r \cdot \Delta^{\frac{1,5\nu}{2\nu+1}}}{\sqrt{\nu} \cdot \left(\frac{2\sqrt{\pi}}{k_\nu} \cdot p_c \cdot \Theta \right)^{\frac{\nu-1}{2\nu+1}}}, \quad (4)$$

для пластического контакта

$$s_n = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot r \cdot \Delta^{0,5}}{\sqrt{v} \cdot (p_c / HB_y)^{v-1}}, \quad (5)$$

где $\Delta = \frac{R_{\max}}{r \cdot \epsilon^{1/v}}$ - комплексная характеристика шероховатостей ПК и ГЦ;

$$\Theta = \frac{1 - \mu_k^2}{E_k} + \frac{1 - \mu_y^2}{E_y} - \text{обобщенная упругая}$$

постоянная;

$$r = \frac{r_k \cdot r_{ц}}{r_k + r_{ц}} - \text{приведенный радиус закругле-$$

ния вершин неровностей;

$R_{\max} = R_{\max, k} + R_{\max, y}$ - наибольшая высота неровностей;

$$v = v_k + v_{ц}$$

$$\epsilon = k_v \cdot \epsilon_k \cdot \epsilon_{ц} \cdot \frac{(R_{\max, k} + R_{\max, ц})^v}{R_{\max, k}^{1/v_k} + R_{\max, ц}^{1/v_{ц}}} - \text{параметры опорной}$$

кривой для случая контакта гладкой и шероховатой поверхностей [9];

$$k_v = \frac{v_k \cdot v_{ц}}{v_k + v_{ц}} \cdot \frac{\Gamma(v_k) \cdot \Gamma(v_{ц})}{\Gamma(v_k + v_{ц})},$$

где $\Gamma(v)$ - числовые коэффициенты, выраженные через Гамма-функции; μ , E , $HB_{ц}$ - коэффициент Пуассона, модуль упругости и твердость материала ГЦ соответственно.

Для расчета времени восстановления адсорбционного слоя $\tau_{ад}$ предполагается, что температура заедания $T_{кр1}$ определяет момент разрушения масляной пленки и образование очагов микросхватывания на поверхности микровыступа. Согласно Кингсбюри [8] связь между долей α_1 металлического контакта при граничной смазке и энергией активации десорбции U описывается уравнением

$$\alpha_1 = 1 - e^{-k_1 \tau}, \quad (6)$$

где

$$k_1 = A \cdot e^{-U/RT}; \quad (7)$$

A - предэкспоненциальный член уравнения Аррениуса, связанный с периодом колебаний адсорбированной молекулы в направлении, перпендикулярном к поверхности, и с расстоянием между адсорбционными центрами; T - абсолютная температура; R - универсальная газовая постоянная; τ - время.

Допуская, что $T=T_{кр1}$ при $\alpha \approx 0,5$ [8], из выражения (6) получим для константы скорости образования металлических связей

$$k_1 = \frac{\ln 2}{\tau_k}, \quad (8)$$

где $\tau_k = d_c / V_{ск}$.

Величина U определяется из формулы Эйкина [8]

$$\alpha_1 = 1 - \exp \left[\frac{-\exp(-U/RT)}{3,2 \cdot 10^5 \cdot V_{ск} \cdot (M/T_M)^{0,5}} \right],$$

где M - молекулярная масса; T_M - температура плавления смазочного материала.

Отсюда при $\alpha=0,5$ энергия активации

$$U = -\ln \left\{ \ln 2 \left[3,2 \cdot 10^{-5} \cdot V_{ск} \cdot (M/T_M)^{0,5} \right] \right\} RT_{кр1}. \quad (9)$$

Таким образом, величину U можно найти из экспериментальных значений $T_{кр1}$ при различных скоростях скольжения $V_{ск}$.

Если принять, что скорость адсорбции молекул на поверхность микровыступа с разрушенным граничным слоем при его последующем движении между пятнами контакта пропорциональна доле $(1-\alpha_2)$ металлического контакта, т.е.

$$\frac{d\alpha_2}{d\tau} = k_2(1-\alpha_2),$$

тогда $\alpha_2 = 1 - e^{-k_2 \tau}, \quad (10)$

где α_2 - доля поверхности микровыступа, занятая адсорбционным слоем; k_2 - константа скорости образования адсорбционных связей.

Допуская значения A и U при нагреве и охлаждении микровыступа в достаточной степени близкими между собой, можно записать

$$k_2 = A \cdot e^{-U/RT_n}, \quad (11)$$

где T_n - средняя поверхностная температура.

Полагая, что времени, остаточному для образования адсорбционного слоя на поверхности микровыступа, соответствует $\alpha_2 = 0,95$ найдем

$$[\tau] = \frac{\ln(0,05)}{k_2}. \quad (12)$$

В качестве примера термовременного расчета на заедание рассмотрено трибосопряжение ПК-ГЦ быстроходного дизеля 8Ч 12/12 в условиях трения на номинальном режиме работы. Основные исходные данные: $R_{\max, k} = 1,6 \cdot 10^{-6}$ м, $R_{\max, ц} = 1,44 \cdot 10^{-6}$ м, $r_k = 270 \cdot 10^{-6}$ м, $r_{ц} = 1000 \cdot 10^{-6}$ м, $v_k = 1,6$, $v_{ц} = 2$, $\epsilon_k = 2,16$, $\epsilon_{ц} = 2,37$, $HB_{ц} = 4$ ГПа, $P_c = 3,3$ МПа, $\mu_k = \mu_{ц} = 0,23$, $a_k = 2,18 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $a_M = 8,64 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $n = 2600$ мин⁻¹, $q = 2,52 \cdot 10^8$ Вт/м², $\delta_M = 0,1 \cdot 10^{-6}$ м при угле поворота коленчатого вала - $\varphi = 370^\circ$ п.к.в., $t_n = 160^\circ$ С, $N = 2$.

Среднее расстояние между пятнами контакта согласно работе [9]

$$s = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Используя известное выражение для среднего диаметра пятна контакта, из работы [9] находим

$$d_c = 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Тогда $\tau_p = \frac{s}{V_{ск}} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ с,}$

$$\tau_k = \frac{d_c}{V_{ск}} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

и, соответственно, по уравнениям (1) и (2)

$$t_{\min} = 160,4^\circ\text{C}, \quad t_{\max} = 218^\circ\text{C}.$$

Согласно работе [9] и нашим исследованиям критическая температура для масла М-10Г₂ составляет $t_{кр1} = 230 \dots 240^\circ\text{C}$.

Следовательно, при данных параметрах трения необходимое условие заедания не соблюдается, и сопряжение ПК-ГЦ будет работать в режиме граничной смазки, хотя с учетом погрешности расчетов (10%) коэффициент запаса надежности против заедания будет минимальным.

Энергия активации при $V_{ск} = 3,6 \text{ м/с}$ и $t_{кр1} = 240^\circ\text{C}$ из уравнения (9) будет

$$U = 38560 \text{ Дж/моль}$$

и согласно уравнениям (8) и (7)

при $\tau_{ад} = \frac{s - d_c}{V_{ск}} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ с,}$

$$k_1 = 2,657 \cdot 10^5,$$

$$A = 2,681 \cdot 10^5.$$

Константа скорости образования адсорбционных связей при $t_n = 160^\circ\text{C}$ и $\tau_{ад} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ из выражения (11) равна $k_2 = 2,653 \cdot 10^5$.

Тогда время, достаточное для образования адсорбционного слоя, по формуле (12) $[\tau] = 1,13 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$

Таким образом, $\tau_{ад}$ больше $[\tau]$ и поэтому достаточное условие заедания не выполняется. Полученные результаты расчетов на заедание трущейся пары ПК-ГЦ подтверждаются работоспособностью дизеля 8Ч 12/12 в условиях номинальной нагрузки.

В заключение следует отметить, что ближайшей задачей совершенствования расчета является дальнейшая разработка экспериментально-теоретических методов оценки энергии активации процессов образования и разрушения граничных слоев моторных масел, а также переходных температур.

Выводы

1. Предложен метод расчета на заедание деталей цилиндра-поршневой группы двигателя внутреннего сгорания, учитывающий теплофизиче-

ские и временные факторы в зоне контакта при неустановившемся характере трения.

2. Приведены формулы для расчета на заедание трибосопряжения поршневое кольцо-гильза цилиндра ДВС в условиях повторно-кратковременного режима трения.

3. Дан пример расчета на заедание пары трения поршневое кольцо-гильза цилиндра быстрого дизеля, результаты которого подтверждаются экспериментальными данными.

Список литературы:

1. *Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин.* – К.: Наукова думка, 1979. – 188 с. 2. Дроздов Ю.Н. и др. *Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник* / Ю.Н.Дроздов, В.Г.Павлов, В.Н.Пучков. – Машиностроение, 1986. – 224 с. 3. Федоров С.В. *Термодинамические представления о процессе схватывания металлов при граничной смазке* / С.В. Федоров // *Трение и износ.* – 1988. – т.9. – №3. – С.403 – 413. 4. Буяновский И.А. *Температурно-кинетический метод оценки температурных пределов работоспособности смазочных материалов при тяжелых режимах граничной смазки* / И.А. Буяновский // *Трение и износ.* – 1993. – т.14. – №1. – С.129 – 142. 5. *Расчет температурной вспышки при множественном контакте и граничной смазке.* / В.Г.Заренбин // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* – Дніпропетровськ: ПДАБА. – 2011. – №6 – 7. – С.12 – 16. 6. Мышкин Н.К. *Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии* / Н.К. Мышкин, Петроковец М.И. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с. 7. *Оценка среднего расстояния между пятнами контакта в паре трения гильза цилиндра -поршневое кольцо двигателя внутреннего сгорания.* / В.Г. Заренбин, Г.Г. Карасев // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2009. №10 – С.23 – 28. 8. Буяновский И.А. *Энергия активации процессов реализации переходных температур при граничной смазке* // *Трение и износ,* 1991. – т.12. – №6. – С.1094 – 1107. 9. Крагельский И.В. *Основы расчетов на трение и износ* / Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.. – М.: Машиностроение, 1977. – 526с. 10. *Влияние температуры на трение и задиры при возвратно-поступательном скольжении образцов* / Р.М. Матвеевский, В.И.Комендант // *Сб. исследование смазочных материалов при трении.* – М.:Наука, 1981. – С.89 – 96.

Bibliography (transliterated):

1. *Slovar'-spravochnik po treniju, iznosu i smazke detalej mashin.* – K.: Naukova dumka, 1979. – 188 s. 2. Drozdov Ju.N. i dr. *Trenie i iznos v jekstremal'nyh uslovijah: Spravochnik* / Ju.N.Drozdo, V.G.Pavlov, V.N.Puchkov. – Mashinostroenie, 1986. – 224 s. 3. Fedorov S.V. *Termodinamicheskie predstavlenija o processe shvatyvanija metallov pri granichnoj smazke* / S.V. Fedorov // *Trenie i iznos.* – 1988. – t.9. – №3. – S.403 – 413. 4. Bujanovskij I.A. *Temperaturno-kineticheskij metod ocenki temperaturnyh predelov rabotosposobnosti smazocznyh materialov pri tjazhelyh rezhimah granichnoj smazki* / I.A. Bujanovskij // *Trenie i iznos.* – 1993. – t.14. – №1. – S.129 – 142. 5. *Raschet temperaturnoj vspyshki pri mnozhestvennom kontakte i granichnoj smazke.* / V.G.Zarenbin // *Visnik Pridniprov's'koj derzhavnoj akademii budivnictva ta arhitekturi.* – Dnipropetrovs'k: PDABA. – 2011. – №6 – 7. – S.12 –

16. 6. Myshkin N.K. *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tehniczeskie prilozhenija tribologii* / N.K. Myshkin, Petrokovec M.I. – M.: FIZMATLIT, 2007. – 368 s. 7. *Ocenka srednego rasstojanija mezhdu pjatnami kontakta v pare trenija gil'za cilindra - porshnevoe kol'co dvigatelja vnutrennego sgoranija.* / V.G. Zarenbin, G.G. Karasev // *Visnik Pridniprovs'koï derzhavnoi akademii budivnictva ta arhitekturi.* – Dnipropetrovs'k: PDABA, 2009. №10 – S.23 – 28. 8. *Bujanovskij I.A. Jenerģija aktivacii*

*processov realizacii perehodnyh temperatur pri granichnoj smazke // Trenie i iznos, 1991. – t.12. – №6. – S.1094 – 1107. 9. Kragel'skij I.V. Osnovy raschetov na trenie i iznos / Kragel'skij I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 526s. 10. Matveevskij R.M. Vlijanie temperatury na trenie i zadir pri vozvratno-postupatel'nom skol'zhenii obrazcov / R.M. Matveevskij, V.I.Komendant // *Sb. issledovanie smazochnyh materialov pri trenii.* – M.: Nauka, 1981. – S.89 – 96.*

Поступила в редакцию 01.07.2013

Заренбин Владимир Георгиевич – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедры Эксплуатации и ремонта машин Приднепровской Государственной Академии Строительства и Архитектуры, Днепропетровск, Украина, e-mail: EPM@mail Pgasas.dp.ua.

Мищенко Николай Иванович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедры Автомобильного транспорта Автомобильно-дорожного института Донецкого национального технического университета, Горловка, Украина.

Богомолов Виталий Виленович – старший преподаватель кафедры Эксплуатации и ремонта машин Приднепровской Государственной Академии Строительства и Архитектуры, Днепропетровск, Украина, e-mail: v-bogomolov66@mail.ru

ДО РОЗРАХУНКУ НА ЗАЇДАННЯ ДЕТАЛЕЙ ЦІПГ ДВЗ

В.Г. Заренбін, М.І. Міщенко, В.В. Богомолов

Запропоновано метод розрахунку на заїдання деталей циліндро-поршневої групи двигуна внутрішнього згорання, що враховує теплофізичні і часові чинники в зоні контакту при несталому характері тертя. Запропонована методика передбачає розрахунок в два етапи: розрахунок максимальної температури на контакт і розрахунок часу, за який на мікроступі може відновлюватися адсорбційний шар. Результати розрахунку дають можливість теоретичної оцінки вірогідності задиру в парі тертя поршневе кільце-гільза циліндра ДВЗ в умовах повторно-короткочасного режиму тертя.

TO THE CALCULATION ON SEIZURE OF DETAILS OF ZPG OF ICE

V.G. Zarenbin, N.I. Mischenko, V.V. Bogomolov

The method of calculation on seizure of details of cylinder-pistons group of internal combustion engine is offered. Calculations were made taking into account thermophysical and temporal factors in the area of contact at the unset character of friction. The offered method includes calculation in two stages: calculation of maximal temperature on a contact and timing, for which on a microledge an adsorption layer can be restored. The results of calculation enable to conduct theoretical estimation of probability of appearance of jamming in the pair of friction piston-ring-shell of cylinder of internal combustion engine in the conditions of the repeatedly-temporal mode of friction.

УДК 629.4.02

Я.К. Склифус, В.И. Могила

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Рассмотрена возможность применения фазовых переходов теплоносителя в системе охлаждения теплового дизеля. Определены преимущества, недостатки и перспективы данного направления. Описана принципиальная схема системы охлаждения дизеля теплового с использованием фазовых переходов теплоносителя, а также определены рациональные физические свойства и химический состав теплоносителя. Также описаны теоретические и экспериментальные исследования работы серийных радиаторных секций в режиме конденсатора пара, математическое моделирование процесса теплоотдачи при конденсации пара в плоскоовальных трубах, и представлены результаты регрессионного анализа экспериментальных данных.

Постановка проблемы

Дизели теплового являются весьма несовершенными тепловыми машинами: из 100% тепловой энергии сгорания топлива только $\approx 37\%$ преобразуется в полезную работу. Остальная теплота теряется в результате теплоотдачи корпуса дизеля ($\approx 3,5\%$), выбрасывается в атмосферу с выхлопными газами ($\approx 35\%$) и отводится теплоносителями: с ох-

лаждающей водой рубашки дизеля $\approx 14,5\%$, с охлаждающим маслом $\approx 10\%$, а также отводится часть теплоты наддувочного воздуха с помощью воздухоохладителя [1]. Тепловая энергия, отведенная теплоносителями, рассеивается в холодильной камере теплового, при этом на циркуляцию теплоносителей и привод вентиляторов холодильной каме-