Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. В. Кудюров, А. В. Пономарев, К задаче диагностики цилиндропоршневой группы дизелей путевых машин в процессе эксплуатации, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2004, выпуск 30, 166–169

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu318>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 44.207.124.84

26 апреля 2023 г., 16:24:14

Математическое моделирование

УДК 621.64

Л.В. Кудюров, А.В. Пономарев

К ЗАДАЧЕ ДИАГНОСТИКИ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДИЗЕЛЕЙ ПУТЕВЫХ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассматривается задача оценки остаточного ресурса цилиндропоршневой группы дизелей путевых машин. На базе теплофизических характеристик смазочного слоя, полученных из решения задачи контактной гидродинамики с учетом объемной вязкости смазки, осуществляется расчет износа поверхности кольца и внутренней поверхности цилиндра, что является основанием для получения достоверной диагностической информации о состоянии данного узла.

Ресурс дизелей путевых машин зависит от многих факторов, среди которых большую роль играет износ контактирующих поверхностей поршневого кольца и внутренней поверхности цилиндра. Поэтому прогнозирование состояния рабочих поверхностей указанного узла является весьма важной и актуальной задачей. Эта задача не нова. Она рассматривалась и другими авторами. Однако методы ее решения отличаются известной сложностью и громоздкостью даже при наличии достаточно грубых допущений. В настоящей работе сделана попытка создать более достоверную методику оценки состояния трущихся поверхностей кольца и цилиндра на базе уже известных теоретических результатов и с учетом некоторых чрезвычайно важных факторов, которыми ранее пренебрегали (непараллельность стенок в смазочном слое, объемная вязкость в смазке, наличие абразивных частиц и др.)

Как известно, износ цилиндропоршневой группы (ЦПГ) обусловлен в основном граничным трением. Вместе с тем существенную роль играет наличие мельчайших твердых частиц, попадающих в смазочный слой в процессе эксплуатации и способствующих преждевременному износу ЦПГ. При этом наиболее крупные частицы могут войти в контакт одновременно с обеими стенками зазора между кольцом и внутренней поверхностью цилиндра. Таким образом, по всей поверхности трения образуется множество гидродинамических микроконтактов. Будем считать в первом приближении распределение частиц равномерным. Тогда в каждом осевом сечении по всей толщине кольца будет равномерно расположено конечное число микроконтактов. Это обстоятельство существенно упрощает задачу, так как при проведении исследования позволяет обойтись без привлечения аппарата теории вероятности.

Следует отметить, что в силу малой толщины зазора, давление в смазочном микрослое может достигать величины, при которой нельзя пренебрегать объемной вязкостью смазки. Учитывая также, что отношение толщины смазочного слоя к его длине мало, слагаемые порядка квадрата этого отношения можно считать величинами второго порядка малости и ими можно пренебречь. С учетом этого уравнения движения рабочей жидкости в слое и уравнение баланса энергии упрощаются и могут быть записаны в безразмерном виде. Кроме того, известно, что в рабочем режиме стенки кольца и цилиндра могут оказаться непараллельными, в связи с чем следует ввести зависимость радиуса r от координаты s , отсчитываемой от входа в смазочный слой. Поэтому целесообразно разделить течение жидкости между стенкой цилиндра и рабочей поверхностью кольца на две части: первая – течение смазки, плотность которой эквивалентна некоторой средней плотности жидкости, включающей твердые микрочастицы, а вторая – течение чистой смазки в микроконтакте.

Для математического описания течения эквивалентной жидкости в смазочном слое между поверхностями цилиндра и кольца (первая часть) используем уравнения неразрывности, движения, баланса энергии, а также уравнения для коэффициента вязкости, плотности, приведенные в [1] с учетом $r=r(s)$ в безразмерном виде:

$$\frac{\partial(\rho \cdot r \cdot v_s)}{\partial s} + \frac{\partial(\rho \cdot r \cdot v_n)}{\partial n} = 0, \quad (1)$$

$$6p = \xi \mu \varphi + p_1, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial n} \left(\mu \cdot \frac{\partial v_s}{\partial n} \right) - \varepsilon \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r}{\partial s} \cdot \mu \cdot \varphi, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial n^2} = p_1 \frac{\varphi}{r} - \mu \left(\frac{\partial v_s}{\partial n} \right) - \varepsilon \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r}{\partial s} \cdot \mu v_s \varphi. \quad (4)$$

Здесь ρ , r , v_s , v_n , p , p_1 , μ , ϑ , φ - безразмерные плотность, радиус, составляющие скорости по касательной и нормали, давление, вязкость, температура и скорость объемного расширения, равная

$$\varphi = \frac{1}{h} \left[\frac{\partial v_s}{\partial s} - \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial s} \right) \right], \quad (5)$$

где h -безразмерная толщина слоя; f -безразмерная функция тока; ε - коэффициент, учитывающий отношение объемной вязкости к сдвиговой;

$$\frac{\partial f}{\partial n} = r v_s, \quad \frac{\partial v_s}{\partial n} = v_n, \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial n} = q; \quad (6)$$

$$p = p_1 + \varepsilon \mu \varphi; \quad (7)$$

$$\mu = \exp \left[\alpha_1 p + (\alpha_2 + \alpha_3 p) \frac{1 - \alpha_4 \vartheta}{1 + \alpha_4 \vartheta} \right]; \quad (8)$$

$$\rho = 1 + \gamma p; \quad (9)$$

α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , γ - постоянные.

С учетом (6) уравнения (3) и (4) можно записать в виде

$$\frac{\partial p_1}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial n} (\mu \cdot v_n) - \varepsilon \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r}{\partial s} \cdot \mu \cdot \varphi; \quad (10)$$

$$\frac{\partial q}{\partial n} = p_1 \frac{\varphi}{r} - \mu v_n - \varepsilon \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r}{\partial s} \cdot \mu v_s \varphi. \quad (11)$$

Толщину смазочного слоя можно принять как

$$h = h_0 + s \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (12)$$

где h_0 - толщина слоя на входе; α - угол отклонения оси кольца от оси цилиндра.

С учетом (12) радиус одной из стенок смазочного слоя (расстояние от оси симметрии до внешней поверхности кольца) равен

$$r = r_0 - h_0 - s \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (13)$$

где r_0 - радиус внутренней поверхности цилиндра.

Граничные условия:

$$S = 0, \quad p = \frac{P_0}{6\rho_0 v_0^2}, \quad \frac{\partial p}{\partial s} = 0;$$

$$S = 1, \quad p = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial s} = 0; \quad (14)$$

$$n = 0, \quad v_s = v_0, \quad v_n = 0, \quad v = v_k;$$

$$n = 1, \quad v_s = 0, \quad v_n = 0, \quad v = v_u;$$

ϑ_k , ϑ_u - безразмерные температуры поверхностей кольца и цилиндра.

Переходя в уравнениях (6), (10), (11) к конечным разностям и применяя метод матричной прогонки [2] с учетом выше указанных положений о плотности слоя, а также с учетом (7)-(9) и (12)-(14), можно получить все интересующие нас характеристики смазочного слоя между трущимися поверхностями кольца и цилиндра, в том числе, давление и температуру, необходимые при расчете износа.

Течение смазки в микроконтакте (вторая часть) отличается тем, что диссипация энергии вследствие проявления влияния объемной вязкости будет заметной, а высокие значения давления и температуры приведут к росту износа взаимодействующих тел - кольца и цилиндра, а также к изменению условий течения жидкости в общем объеме смазочного слоя.

На уровне микроконтактов, в соответствии с гипотезой Винклера, уравнения для толщины смазочного слоя [3] можно записать в виде:

$$h = h_{1m} - \Delta + \frac{x^2}{2\rho_{np}} + \frac{A'}{E} P, \quad (15)$$

где Δ - смещение профилей стенок, обусловленное деформацией при контакте; h_{1m} - минимальная толщина смазочного слоя до деформации; ρ_{np} - приведенный радиус кривизны поверхности трения;

A' – постоянная Винклера; E – модуль упругости материала стенки; x – координата вдоль слоя, отсчитывается от входа смазочного слоя в микроконтакте.

После приведения к безразмерному виду [4] уравнение (14) сводится к виду

$$H = 1 - X_1^2 + X^2 + CP, \quad (16)$$

где H, X, X_1, P – безразмерные толщина смазочного слоя, текущая координата, значение координаты на выходе, давление в микроконтакте; C – постоянная, равная

$$C = \frac{A' 6 \mu_0 u_0 L}{h_0^3 E},$$

L – длина смазочного слоя: $L = \sqrt{2 h_0 \rho_{np}}$, h_0 – толщина смазочного слоя на выходе из микроконтакта; μ_0, u_0 – значения вязкости и продольной составляющей скорости на входе.

Давление в микроконтакте, в силу малой площади контакта, может достигать величин p_k (критическое давление), выше которых проявляются свойства неньютоновской жидкости. Поэтому, с учетом (8), можно записать следующие формулы для безразмерной вязкости смазки в микроконтакте:

$$M = \exp \left[\alpha_1 P + (\alpha_2 + \alpha_3 (P - P_k)) \frac{1 - \alpha_4 \theta}{1 + \alpha_4 \theta} \right], \text{ при } p > p_k \quad (17)$$

$$M = \exp \left[\alpha_1 P + (\alpha_2 + \alpha_3 P) \frac{1 - \alpha_4 \theta}{1 + \alpha_4 \theta} \right], \text{ при } p < p_k \quad (18)$$

где θ – безразмерная температура смазки в микроконтакте.

Полная система уравнений, описывающих состояние смазки в микроконтакте, согласно [5] может быть записана в виде:

$$\frac{\partial F}{\partial \eta} = RU, \quad \frac{\partial U}{\partial \eta} = V, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = Q; \quad (19)$$

$$\frac{\partial(MV)}{\partial \eta} = 6H^3 \frac{\partial P_1}{\partial x}; \quad (20)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \eta} = 6H^2 P_1 \Phi - \frac{1}{H^2} MV^2 + R \left[H \left(U \frac{\partial \theta}{\partial X} - \frac{P}{R} \frac{\partial F}{\partial X} \right) + 2\eta XUQ \right] P_e \frac{h_0}{L}; \quad (21)$$

$$\Phi = \frac{1}{H} \left[\frac{\partial U}{\partial X} - \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial F}{\partial X} \right) \right]; \quad (22)$$

$$P = P_1 + \varepsilon M \Phi; \quad (23)$$

$$M = \exp \left[\alpha_1 P + (\alpha_2 + \alpha_3 P) \frac{1 - \alpha_4 \theta}{1 + \alpha_4 \theta} \right], \text{ при } p < p_k; \quad (24)$$

$$M = \exp \left[\alpha_1 P + (\alpha_2 + \alpha_3 (P - P_k)) \frac{1 - \alpha_4 \theta}{1 + \alpha_4 \theta} \right], \text{ при } p > p_k; \quad (25)$$

$$R = 1 + \gamma P; \quad (26)$$

$$H = 1 - X_1^2 + X^2 + CP, \quad (27)$$

где P_e – число Пекле; $F, U, \theta, P, M, R, H, \Phi$ – безразмерные функция тока, продольная составляющая скорости, температура, давление, вязкость, плотность, толщина слоя и скорость объемного расширения соответственно; X, η – безразмерные координаты вдоль и поперек слоя; $\varepsilon = \frac{\zeta}{\mu} \frac{h^2}{L^2}$; ζ – объемная вяз-

кость; μ – сдвиговая вязкость.

Граничные условия:

$$\eta = 0, F = 0, U = H(X)U_0, \theta = 0; \eta = 1, F = a = const, U = 0, \theta = \chi; \quad (28)$$

$$X = X_0, P = 0; X = X_1, P = 0, \frac{\partial P}{\partial X} = 0. \quad (29)$$

Переход в уравнениях (19)-(22) к конечным разностям приводит совместно с (24)-(27) к замкнутой системе алгебраических уравнений относительно неизвестных $F, U, \theta, P, M, R, H, Q, V$, характеризующих смазку в каждой точке течения в микроконтакте.

Точность решения уравнений в конечных разностях, как известно, зависит от размерности координатной сетки, которой следует покрыть всю область смазочного слоя как в общей зоне течения (s, η) , так и в микроконтактах (X, η) .

Теперь, когда теплофизические характеристики и напряженное состояние в зоне контакта становятся известными из решения выше рассмотренной задачи контактной гидродинамики, нетрудно оценить интенсивность износа по известным соотношениям, полученными другими авторами. В рассматриваемом случае предлагается для определения износа использовать модель, базирующуюся на известной концепции С.Н. Журкова [6] о циклическом отделении частиц износа при трении. Полученные результаты были положены в основу построения модели износа, приведенной в [7], согласно которой интенсивность объемного изнашивания равна

$$I_{vi} = \frac{V_{kp}}{\lambda \cdot \xi \cdot g \cdot t_0 \cdot \exp \left[\frac{(U_0 - \psi \gamma p k_{\phi}) k_m}{R_r T} \right]},$$

где p – давление в зоне контакта; T – температура; U_0 – энергия активации; i – номер режима;

Остальные величины V_{kp} , λ , ξ , g , t_0 , ψ , γ , k_{ϕ} , k_m , R_r – постоянные, характеризующие структуру и причины изнашивания. Расчетная формула износа имеет вид $U = \sum_{i=1}^n \frac{I_{vi}}{S_i} t_i$, где S_i – площадь фактического контакта; t_i – продолжительность i -го режима работы.

Значение величины износа позволяет откорректировать диаметры кольца и цилиндра, а также угол отклонения оси кольца от оси симметрии и, следовательно, получить новые исходные данные для решения задачи контактной гидродинамики и получить новые температуру и давление для расчета износа на следующем шаге. Сравнение текущих диаметров с предельными позволяет при расчетной интенсивности износа оценить остаточный ресурс ЦПГ дизеля и решить задачу диагностики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудюров Л.В., Карабин А.В., Шахов В.Г. Об основных уравнениях течения рабочей жидкости в смазочном слое при гидроэкструзии металлов // Самара: Известия СНЦ РАН, 2001. С.84-88
2. Себиси Т., Брэдишоу П. Конвективный теплообмен. М.: Мир, 1987. 599 с.
3. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. М.: Наука, 1976. 225 с.
4. Кудюров Л.В. Математическое моделирование и исследование развитых пластических течений при обработке металлов давлением // Вестник СамГТУ. Серия: Техн. науки. 1998. Вып.5. С.60-67.
5. Громаковский Д.Г., Кудюров Л.В., Маринин В.Б., Шахов В.Г. Конечно-разностный метод решения задачи контактной гидродинамики с учетом объемной вязкости смазки // ДАН РФ, 1997. Т. 352. №6. С.757-758
6. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности // Физика твердого тела. 1980. Т.22. С.3344-3349
7. Громаковский Д.Г., Разрушение поверхностей при трении и разработка кинетической модели изнашивания // Вестник машиностроения, 2000. №1. С.3-18.

Поступила 23.10.2003 г.