

Н.Я. Яхьяев, д-р техн. наук, М.Д. Ханустанов, инж.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ВТУЛОК ЦИЛИНДРОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Введение

Прогнозирование работоспособности технических систем – это научное направление, изучающее предвидение или предсказание изменения технического состояния системы и определение продолжительности ее безотказной работы.

Прогнозирование работоспособности при разработке технического задания на двигатель внутреннего сгорания (ДВС) позволяет в определенной степени управлять его надежностью.

Работоспособность ДВС нарушается вследствие физического износа, через более или менее продолжительный срок службы. Наиболее распространенной причиной выхода деталей машин из строя является не поломка, а износ втулок цилиндров и повреждение их рабочих поверхностей [1].

Для практики дизелестроения и эксплуатации важно знать ресурсы отдельных деталей, как для целей совершенствования машины, так и для разработки основных контуров технической эксплуатации. В эксплуатации же эти сведения необходимы для планирования ремонта машин.

Ресурс деталей судовых дизелей можно определить по параметрам их изнашивания (линейный износ, интенсивность или скорость изнашивания).

Предельным значением износа является то значение, которому соответствует: начало резкого возрастания интенсивности изнашивания; предельно допустимое снижение прочности изнашиваемой детали вследствие изменения ее размеров, выходящее за пределы допустимых значений; влияние износа детали трибосоприжения на работоспособность других деталей; отказ машины.

Обеспечение высокой надежности судового дизеля требует разработки эффективных расчетных методов и моделей для прогнозирования долговечности и износостойкости материалов деталей в узлах трения при граничной смазке в широком диапазоне изменения условий эксплуатации и с учетом переменных режимов работы ДВС.

Постановка задачи. Учитывая многообразие факторов и переменчивость большинства из них в каждый момент трения, при получении новых расчетных зависимостей следует исходить из результатов всестороннего анализа обширного банка ста-

тистических данных и тщательной обработки экспериментальных данных об изнашивании деталей, полученных в натурных условиях и при стендовых испытаниях современных высокофорсированных дизелей.

Методика прогнозирования показателей долговечности втулок цилиндров включает: 1) установление корреляционной зависимости между износом и временем работы; 2) построение расчетных моделей относительного износа исследуемого сопряжения втулка цилиндра – поршневое кольцо; 3) получение уравнений линейного износа втулок цилиндров с учетом влияния рабочих параметров в эксплуатации дизелей; 4) определение интенсивности изнашивания втулок цилиндров с учетом действующих механических, физических и химических факторов; 5) расчет ресурса втулок цилиндров судовых дизелей с использованием новых расчетных зависимостей и согласование результатов расчета с результатами, полученными в эксплуатации.

Для установления корреляционной зависимости между износом и временем работы, были использованы данные по износам деталей, полученные различными научно-исследовательскими коллективами, судоремонтными и дизелестроительными заводами в процессе освидетельствования главных и вспомогательных судовых дизелей. Статистическая обработка результатов измерения производилась методами модальных интервалов, наименьших квадратов и средних квадратичных ошибок, использовались и другие методы математической статистики.

Подобрана математическая функция, которая наилучшим образом аппроксимирует кривые износа, полученные по результатам измерения износа в эксплуатации:

$$\tilde{V} = K_u \cdot t^n, \quad (1)$$

где V – износ, мм, K_u – коэффициент пропорциональности, t – наработка, час., n – весомость ($n = 0,45 \dots 0,65$). Для нахождения коэффициента K_u в этой формуле использован метод наименьших квадратов. Значения коэффициентов для некоторых исследуемых дизелей показаны в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов K_n некоторых двигателей

Марка ДВС	4ДР 30/50	4Ч 10,5/13	6Ч9,5/11	4ЧП 17,5/24
K_n	0,657	0,225	0,212	0,356

На основе критериальных зависимостей, учитывающих влияние различных факторов на процесс изнашивания получены расчетные модели относительного износа деталей исследуемых трибосопряжений. Например, для втулок цилиндров судовых дизелей относительный линейный износ:

$$\Delta_{вт} = \frac{Y}{D} = K_0 \cdot \theta_k^{0,7} \cdot P_e^{0,2} \cdot T_{об}^{0,4} \cdot t^{0,5} \quad (2)$$

где K_0 – коэффициент пропорциональности ($K_0=1,36 \cdot 10^{-4}$);

$$\theta_b = \frac{\alpha \cdot f \cdot P_z \cdot C_m \cdot h_k}{\lambda_{\%01} + \lambda_b} - \text{критерий, характери-}$$

зующий температурные условия на поверхности трения (при трении кольца по втулке цилиндра);

$$f = 0,02 \lg \frac{P_z \cdot H B \pi D h_k}{\nu C_m E_{np} S} + 0,14 - \text{коэффициент}$$

трения поршневого кольца по стенке цилиндра определяется по методике [3];

$$P_e = \frac{C_m h_k}{a_{em}} - \text{число Пекле, характеризую-}$$

щее отношение осевого и поперечного тепловых потоков в зоне контакта пары трения;

$$T_{об} = \frac{V_s}{S_{m.o} \cdot h_k} - \text{критерий, характеризующий на-}$$

грев трущихся тел при сгорании топлива в цилиндре и пропорциональный приращению объемной температуры.

В таблице 2 показаны значения коэффициентов трения, критериев приращения контактной температуры, чисел Пекле и приращения объемной температуры, полученные по вышеприведенным зависимостям.

Таблица 2. Коэффициенты трения, критерии приращения контактной температуры, чисел Пекле и приращения объемной температуры

№	Марка дизеля	f	θ_k	P_e	$T_{об}$
1	4 Ч 10,5/13	0,04	2,10	2925	5,83
2	6 ЧСП 9,5/11	0,04	2,05	2876	6,05

Анализ полученных результатов. Рассмотрим пример расчета относительного износа втулки цилиндра дизеля 4Ч 10,5/11 через 4 тыс. часов работы и сравним результат с данными, полученными

в эксплуатации. В уравнение (2) подставим значения из табл. 2.

$$\Delta_{вт} = \frac{Y}{105} = 1,36 \cdot 10^{-4} \cdot 2,1^{0,7} \cdot 2925^{0,2} \cdot 5,84^{0,4} \cdot 4^{0,5} = 0,0429 \text{ мм.}$$

Износ по диаметру втулки цилиндра составит $Y = 0,00429 \cdot 105 = 0,45 \text{ мм.}$

Данное расчетное значение полностью соответствует среднестатистическому значению, полученному при обработке эксплуатационных данных износа втулок цилиндров дизеля 4Ч 10,5/11. Расчетное значение износа при наработке 2 тыс. часов составляет 0,338 мм, что на 97% совпадает с данными, полученными в эксплуатации.

Для практики большое значение имеет прогнозирования ресурса дизелей по износу деталей в узлах трения с использованием простых и эффективных расчетных зависимостей, учитывающих влияние на износ основных рабочих параметров и показателей, таких как максимальное давление, средняя скорость поршня, диаметр цилиндра, тактность двигателя и др. Выполненные исследования позволили получить уравнение износа втулок цилиндров в зависимости от вышеназванных параметров и показателей в виде степенного одночлена

$$Y = 0,0003 P_z^{0,7} C_m^{0,9} (D 10^2)^{1,4} m^{0,4} t^{0,5}, \quad (3)$$

где $(0,0003 P_z^{0,7} C_m^{0,9} (D 10^2)^{1,4} m^{0,4}) = K_n$ в формуле (1); P_z – максимальное давление сгорания, МПа, C_m – средняя скорость поршня, м/с, D – диаметр цилиндра, м, m – способ осуществления рабочего цикла (коэффициент тактности (2 или 4), t – наработка дизеля, час. В скобках 10^2 – переводной коэффициент.

Рассмотрим пример расчета по уравнению (3) износа втулки цилиндра дизеля 8ЧРН24/36. Основные параметры двигателя приведены в таблице 3.

Таблица 3

Марка двигателя внутреннего сгорания	Максимальное давление сгорания, МПа	Средняя скорость поршня, м/с	Диаметр цилиндра, м	Коэффициент тактности,
8ЧР24/36	5,5	4,3	0,24	1/2

Для 20 тыс. ч.

$$Y = 0,0003 5,5^{0,7} 4,3^{0,9} 24^{1,4} 0,5^{0,4} 20^{0,5} = 1,06 \text{ мм.}$$

Для 9 тыс. ч. $Y = 0,71 \text{ мм.}$

Для 4 тыс. ч. $Y = 0,47 \text{ мм.}$

Результаты расчетных значений износа втулок цилиндров совпадают со среднестатистическими значениями на уровне 95%...98%.

Таким образом, уравнения (2) и (3) могут быть рекомендованы для количественной оценки линейного износа по диаметру втулок цилиндров при прогнозировании работоспособности различных марок судовых дизелей по износу деталей в узлах трения.

Важное значение для прогнозирования срока службы деталей имеет средняя интенсивность изнашивания, учитывающая влияние действующих механических, физических и химических факторов. Приведенная в работе [4] формула расчета средней интенсивности изнашивания втулок цилиндров судовых дизелей позволяет получить результаты с точностью до 85% и может быть рекомендована для практики эксплуатации деталей двигателей.

$$J_p = K \cdot \left\{ \left[\frac{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}{h_{rp} + 1,7h_k \left(\frac{\mu \cdot C_u}{P_z \cdot h_k} \right)^{0,7} \cdot (P_z \cdot \beta)^{0,6}} \right]^x \cdot \left(\frac{P_z}{HB} \right)^y \cdot \left(\frac{t_p}{t_b} \right)^z \cdot \left(\frac{t_p}{t_k} \right)^f \cdot \left(\frac{RT}{Q} \right)^d \right\} \quad (4)$$

здесь K – коэффициент, учитывающий условия эксплуатации и другие неучтенные факторы; h_{rp} – толщина граничного слоя стенки ($h_{rp} = 10^{-7} \text{ м}$, [5]); μ – коэффициент динамической вязкости масла; β – коэффициент вязкости масла; C_u – скорость скольжения в месте наибольшего износа, м/с; P_z – максимальное давление сгорания, МПа; t_p, t_b – временные факторы [6] кинетических процессов разрушения и восстановления поверхностных слоев; t_k – время формирования пленок трибохимической природы в контакте; $x, y, z, f, \alpha, \beta$ – показатели степени (определяются по результатам экспериментальных исследований износа); RT/Q – критерий, характеризующий устойчивость граничных смазочных слоев; R – универсальная газовая постоянная; Q – теплота адсорбции; T – абсолютная температура ($T \geq 20^\circ \text{ C}$).

Средняя интенсивность изнашивания цилиндрических втулок J_s по эксплуатационным данным определяется по формуле:

$$J_s = \frac{Y}{S_{ск}}, \quad (5)$$

где Y – наибольший износ, мм; $S_{ск} = 2 \cdot h_k \cdot n \cdot 60 \cdot t$ – путь трения скольжения поршневого кольца в месте наибольшего износа (в верхней части втулки цилиндра), м; h_k – высота поршневого кольца, м; n – частота вращения коленчатого вала, мин^{-1} ; t – время работы дизеля, час.

Для дизеля марки 8ЧРН24/36

$$S_{ск} = 2 \cdot 0,006 \cdot 360 \cdot 60 \cdot 20000 = 5,184 \cdot 10^6 \text{ (м)}.$$

$$J_s = \frac{Y}{S_{ск}} = \frac{0,173 \cdot 10^{-2}}{5,184 \cdot 10^6} = 3,337 \cdot 10^{-10}.$$

В знаменателе путь трения скольжения может быть представлен в виде $S_{ск} = C_{мк} \cdot t$, где $C_{мк}$ – скорость относительного скольжения деталей в месте наибольшего износа. В нашем случае $C_{мк} = 5,184 \cdot 10^6 / 20000 = 259,2 \text{ м/ч} = 0,072 \text{ м/с}$.

Интенсивность изнашивания в верхней части втулки цилиндра по формуле (4) составляет $J_p = 4,966 \cdot 10^{-10}$

Коэффициент, учитывающий условия эксплуатации

$$K = \frac{J_s}{J_p} = \frac{3,337 \cdot 10^{-10}}{4,966 \cdot 10^{-10}} = 0,672.$$

Значения средних интенсивностей изнашивания цилиндрических втулок некоторых судовых дизелей, полученные по эксплуатационным данным J_s и по формуле (4) J_p , а также коэффициента K приведены в таблице 4.

Таблица 4. Интенсивности изнашивания втулок цилиндров различных ДВС по эксплуатационным данным J_s , по расчету J_p и коэффициенты K

№	Марка дизеля	$J_s \cdot 10^{-10}$	$J_p \cdot 10^{-10}$	K
1	2	3	4	5
1	4 ДР 30/30	4,924	5,599	0,879
2	NVD-36(8ЧРН24/36)	3,337	4,966	0,672
3	NVD-48(6ЧР 32/48)	3,276	4,921	0,677
4	4 Ч 10,5/13	1,389	12,959	0,107
5	6 ЧСП 9,5/11	0,301	4,098	0,073

Для прогнозирования срока службы деталей цилиндропоршневой группы используем параметры изнашивания, полученные в результате расчета по уравнениям (3) и (4).

Исходя из (5) составим уравнение для определения срока службы втулки цилиндра.

$$t = \frac{Y}{J \cdot C_{ми}} \quad (6)$$

Располагая значениями Y, J и $C_{ми}$, получим (на примере судового дизеля 8ЧРН24/36)

$$t = \frac{Y}{J \cdot C_{ми}} = \frac{1,06 \cdot 0,36}{3,337 \cdot 10^{-10} \cdot 0,072 \cdot 10^9} = 15,9 \text{ тыс.ч.},$$

где $0,36 \cdot 10^{-9}$ – переводной коэффициент.

Заключение. Сравнение результатов расчета срока службы по износу втулок цилиндров с ре-

зультатами, отриманими на основі статистическої обробки експлуатаційних даних по износу деталей трибосопряжених цих марок дизелів, показує, що їх расхождение не превышает $\frac{17-15,9}{15,9} \cdot 100\% = 7\%$. Здець 17 тис.ч. наработка, по-

лученная по даним експлуатації дизеля 8ЧРН24/36. Таким образом, уравнения (1) - (6) могут быть рекомендованы для прогнозирования работоспособности судовых дизелей по износу деталей в узлах трения, так как сходимость результа-

тов расчетов с данными эксплуатации превышает 85%.

Список литературы:

1. Старосельский А.А. Долговечность трущихся деталей машин / А.А. Старосельский, Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1967. – 395 с. 2. Яхьяев Н.Я. Влияние параметров рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания на износ втулок цилиндров / Н.Я. Яхьяев // Трение и износ. – 2002. – Т23, № 5. – С.571-574. 3. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник [Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков]. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с. 4. Яхьяев Н.Я. Оценка интенсивности изнашивания втулок цилиндров и поршневых колец судовых двигателей внутреннего сгорания / Н.Я. Яхьяев // Двигателестроение. – 2002. – №4. – С.6-9.

УДК 621.438

О.Ю. Жулай, инж., Д.М. Барановський, канд. техн. наук

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ АВТОТРАКТОРНИХ ДИЗЕЛІВ

Вступ

В сучасних умовах виробництва техніко-економічна ефективність використання техніки тісно пов'язана зі стратегіями їх обслуговування. Особливе місце в системі забезпечення працездатності машин займає складова отримання інформації про зміну технічного стану.

Ґрунтуючись на визначеннях ГОСТ 30848-2003 (ИСО 13380:2002) “Діагностування машин по робочим характеристикам. Загальні положення”, проведено аналіз технічного стану – виявлення сутності, закономірностей, тенденцій, причин процесів деградації машин на основі моніторингу технічного стану з метою прогнозування, планування, корекції, управління й прийняття рішень.

Моніторинг технічного стану – вияв і збір інформації (знань) і даних спостережень, характеризуючих технічний стан машини. Звичайно, в практиці виявлення виду технічного стану дизелів ЗТ розуміють отримання достовірної інформації, вчасно та в достатньому обсязі.

Рішення даного питання, стосовно автотракторних дизелів, досягається застосуванням стратегій діагностування, ТОР при забезпеченні надійності двигунів на основі системного підходу інформаційного забезпечення з використанням систем моніторингу технічного стану.

Вирішення проблеми застосування систем

моніторингу технічного стану автотракторних дизелів можливе лише за умови вирішення певного кола питань. Насамперед до них відноситься значна невідповідність існуючої нормативно-технічної документації наявним умовам виробництва. Зокрема це виявляється в неадекватності термінів виконання технічних дій [1, 3-5]. Відсутній єдиний алгоритм отримання інформації та проведення технічних дій щодо забезпечення надійності автотракторних дизелів в працездатному стані.

Забезпечення сервісних служб обслуговуючих організацій засобами діагностики, попередження та усунення несправностей не відповідає сучасним вимогам [2]. Існуюче технологічне оснащення або морально та фізично не задовольняє потреби, або наявне в недостатній кількості. Але навіть існуюче обладнання не завжди використовується з максимально можливою віддачею внаслідок низької кваліфікації працівників [6, 7, 9].

Експериментальна частина

Дослідження проводились на базі двох підприємств Кіровоградської області, а саме ТОВ “СВК Україна”, Добровеличківський район та ТОВ “Зерновик”, Новоукраїнський район.

За [1] розраховуємо коефіцієнт готовності та технічного використання згідно двох стратегій виконання робіт ТОР.

Дані розрахунків представлені в табл.1.