

УДК 621.89:621.431 –729.3

**А.В. Надежкин**

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

## **КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ТРИБОМОНИТОРИНГА ДЕТАЛЕЙ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ КРЕЙЦКОПФНЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

*Предложен метод скользящей интервальной оценки коэффициентов корреляции между данными трибомониторинга и наработкой деталей цилиндропоршневой группы судовых крейцкопфных малооборотных дизелей. Даны результаты корреляционного анализа, выполненного на их основе.*

**Ключевые слова:** судовые крейцкопфные дизели, трибомониторинг, изнашивание, корреляционный анализ, отработанное цилиндрическое масло.

**A.V. Nadezkin**

## **CORRELATION ANALYSIS OF TRIBOMONITORING DATA THE CYLINDERPISTON GROUP CROSSHEAD DIESELS**

*Proposed a method for moving interval estimation of the correlation coefficients between the data of tribomonitoring and operation time of the cylinder-piston group of low-speed marine crosshead diesel engines. Given the results of correlation analysis performed on their basis.*

**Key words:** marine crosshead diesel engine, tribomonitoring, wear processes, correlation analysis, drain cylinder oil.

Трибомониторинг судовых крейцкопфных малооборотных дизелей (МОД) на основании исследования параметров отработанных цилиндрических масел (ОЦМ) из поршневых полостей является эффективным средством управления техническим состоянием деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) этих двигателей [2]. Проба масла, взятая из работающего двигателя, несет в себе комплексную информацию о состоянии его трибосопряжений. Прогнозирование остаточного ресурса деталей ЦПГ крейцкопфных МОД является логическим продолжением задачи оценки технического состояния объекта диагностирования (ОД) по результатам трибомониторинга, поскольку именно на основании такой информации может приниматься решение о виде и периодичности технического обслуживания ОД.

Установившийся износ трущихся деталей дизеля традиционно оценивают как функцию от времени их работы [3]. Исследуем возможности трибомониторинга для прогнозирования остаточного ресурса деталей ЦПГ крейцкопфных МОД. С этой целью посредством статистической обработки большого массива экспериментальных данных оценим возможную корреляционную связь между концентрацией продуктов износа в отработанном цилиндрическом масле и наработкой деталей ЦПГ крейцкопфного дизеля.

В различных приложениях статистического анализа многомерных величин одну из ключевых позиций занимают задачи корреляционного анализа [1]. В процессе решения этих задач выявляется наличие и характер взаимосвязи величин, взаимозависимости величин при устранении влияния совокупности других или зависимости

одной случайной величины от группы величин, вычисляются оценки коэффициентов и матриц парной, частной и множественной корреляции, проверяются различные статистические гипотезы относительно параметров многомерного распределения и коэффициентов корреляции. На основании результатов корреляционного анализа может делаться вывод о наличии и характере функциональной зависимости или о предпочтительности для описания исследуемого объекта регрессионной модели того или иного вида.

В испытательную лабораторию «Химмотология» с судов Дальневосточного бассейна регулярно сдавались пробы ОЦМ из подпоршневых полостей крейцкопфных МОД. Обязательным требованием было указание наработки всех деталей, а также наработки цилиндра после моточистки. Эти требования не всегда и не во всем соблюдались, тем не менее была получена значительная экспериментальная выборка. Из неё были выбраны результаты только для двигателей 6ДКРН 74/160 ( $P_e = 8530$  кВт,  $n = 140$  мин<sup>-1</sup>), так как по ним выборка оказалась наиболее репрезентативной и включала в себя анализ (348) с полной информацией о наработке деталей. Типовой протокол анализа проб масла ОЦМ представлен в таблице.

**Бланк результатов анализа масел подпоршневых полостей т/к «Уренгой»  
The form of results of the analysis of drain cylinder oil t/k «Urengoj»**

Дата анализа	<b>25.11.1995</b>					
Двигатель	<b>6 ДКРН 74/160-3</b>					
Параметр	Цилиндр № 1	Цилиндр № 2	Цилиндр № 3	Цилиндр № 4	Цилиндр № 5	Цилиндр № 6
Сорт топлива	<b>М-100</b>					
Содержание серы, %	<b>2,36</b>					
Остаточное ТВН, мг КОН/г	29,53	30,62	4,89	23,67	21,79	28,9
Марка масла	<b>Chevron Delo Cyloil Heavy</b>					
Индекс ТНВД	30	30	30	30	30	30
Подача масла	5	5	5	5	5	5
Наработка цилиндра после моточистки, ч	6480	1209	1209	3224	3224	2913
Наработка втулки, ч	6480	1209	16793	3224	16793	2913
Наработка головки поршня, ч	6480	1209	1209	3224	3224	2913
Наработка колец, ч	1209	1209	1209	3224	3224	2913
Наработка форсунки, ч	300	668	90	416	918	416
Содержание, г/т:						
железа	86,00	61,00	38,00	196,00	139,00	66,00
хрома	4,8	2,3	0,5	6,8	12	1
свинца	8	5	0,6	3,60	7,2	0,3
никеля	1,4	3,2	3	3,7	2,6	6
алюминия	8,1	6,5	1	4,9	9,2	2
олова	6,80	5,1	1,2	3,8	5,70	0,7
меди	2,80	2,5	6,1	6,3	3,2	0,70
кремния	7,10	5,40	2,8	10,1	13	3

Корреляционный анализ полученных экспериментальных данных предполагал их статистическую обработку с целью определения парных (частных) коэффициентов корреляции для характеристики степени зависимости между двумя переменными на фоне действия остальных показателей.

Исследовалась корреляционная зависимость между следующими переменными:

- концентрацией Fe  $c^{\text{Fe}}$  в ОЦМ и наработкой цилиндра после моточистки  $\tau_{\text{ЦМ}}$  с учетом времени работы втулки  $\tau_{\text{ЦВ}}$ ;

-  $c^{\text{Fe}}$  в ОЦМ и  $\tau_{\text{ЦВ}}$  с учетом  $\tau_{\text{ЦМ}}$ ;

-  $c^{\text{Fe}}$  в ОЦМ и наработкой поршня  $\tau_{\text{П}}$  с учетом  $\tau_{\text{ЦМ}}$ .

Расчет парных коэффициентов корреляции  $R_{xy}$  вели по классической формуле Пирсона [1]:

$$R_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}},$$

где  $x_i$  и  $\bar{x}$  – текущая и средняя наработка исследуемой детали ЦПГ соответственно;  $y_i$  и  $\bar{y}$  – текущее и среднее содержание Fe в пробе ОЦМ соответственно.

В процессе корреляционного анализа гипотетическая связь между содержанием продуктов износа в ОЦМ и наработкой деталей оказалась слабо выраженной. Частные коэффициенты корреляции для отмеченных выше связей имели следующие значения:

-  $R_{\text{ЦМ}}^2 = 0,089$ , где  $R^2$  – квадрат коэффициента корреляции между  $c^{\text{Fe}}$  и  $\tau_{\text{ЦМ}}$ ;

-  $R_{\text{ЦВ}}^2 = -0,032$ , где  $R^2$  – квадрат коэффициента корреляции между  $c^{\text{Fe}}$  и  $\tau_{\text{ЦВ}}$ ;

-  $R_{\text{П}}^2 = -0,012$ , где  $R^2$  – квадрат коэффициента корреляции между  $c^{\text{Fe}}$  и  $\tau_{\text{П}}$ .

Традиционно считается, что при  $R < 0,5$  корреляционная связь слабо выражена, а в окрестностях нуля полностью отсутствует.

Однако анализ априорной информации [2] показывает, что при достижении предельных зазоров в трущихся сопряжениях, потере упругости поршневых колец мы наблюдаем резкое увеличение концентрации продуктов износа в ОЦМ. Поэтому для детального исследования корреляционных связей между наработкой деталей ЦПГ и  $c^{\text{Fe}}$  в ОЦМ была разработана специальная методика скользящей интервальной оценки коэффициентов корреляции с целью выявления трендов между данными параметрами. Рассчитывались не просто частные коэффициенты корреляции, а их кинетические кривые по наработке деталей.

Метод скользящей интервальной оценки коэффициентов корреляции предусматривал разбиение всего диапазона наработки каждой детали на равные интервалы  $\Delta\tau$ . В качестве шага была выбрана традиционная в судовой практике интервальная оценка – 1000 ч работы. Совместная генеральная совокупность пар наблюдений последовательно видоизменялась. Каждый раз из всего массива наблюдений формировалась новая ковариационная матрица, размер которой определялся вектором  $\tau^i$ . Его вычисление осуществлялось для каждой детали ЦПГ индивидуально. Ниже дано выражение для расчета скользящего интервала наблюдений применительно к ЦВ.

$$\tau_{\text{ЦВ}}^i = \tau_{\text{ЦВ}}^{\text{max}} - \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i,$$

где  $\tau_{ЦВ}^i$  – текущие значения вектора наработки ЦВ;  $\tau_{ЦВ}^{\max}$  – максимальная наработка ЦВ в массиве наблюдений;  $n$  – число интервалов, определяемое отношением  $\tau_{ЦВ}^{\max} / \Delta\tau$ .

Для остальных деталей ЦПГ расчет скользящего интервала наблюдений осуществлялся аналогичным образом.

Результаты расчетов скользящих интервальных коэффициентов корреляции представлены на рис. 1-3. Анализ данных показывает, что тесная корреляционная взаимосвязь между концентрацией продуктов износа в ОЦМ и наработкой деталей возникает тогда, когда вырабатывается их ресурс. Причем определяющим здесь является состояние поршневых колец. При их хорошем техническом состоянии, даже если втулка и поршень имеют предельную наработку, корреляция между содержанием Fe в пробах масла подпоршневых полостей и ресурсными показателями деталей ЦПГ не наблюдается. Однако, как только уплотняющий эффект поршневых колец снижается, появляется тесная корреляционная взаимосвязь между скоростью поступления в ОЦМ Fe и наработкой деталей. Она оказывается тем выше, чем больше наработка соответствующих деталей. Это хорошо иллюстрируют кинетические кривые коэффициентов корреляции. Так,  $R_{ЦВ}^2$  при наработке цилиндра после моточистки от 0 до 6 тыс. ч имеет очень низкие или даже отрицательные значения (рис. 2). Однако после выработки ресурса ПК (ориентировочно 6-7 тыс. ч) значение  $R_{ЦВ}^2$  резко возрастает до величины 0,5-0,6, указывая на наличие сильной корреляционной связи между  $c^{Fe}$  и  $\tau_{ЦВ}$ . Аналогичную картину мы наблюдаем и для  $R_{П}^2$  (рис. 3).

Из изложенного выше следует, что результаты трибомониторинга деталей ЦПГ крейцкопфных МОД позволяют однозначно распознать техническое состояние ОД. При достижении близких к предельным зазорам в парах трения корреляционная связь между  $c^{Fe}$  в ОЦМ и наработкой деталей резко возрастает. Однако использовать данные трибомониторинга для прогнозирования остаточного ресурса деталей ЦПГ не представляется возможным, так как в течение всего периода установившегося износа триад трения корреляционная взаимосвязь между  $c^{Fe}$  в ОЦМ и наработкой деталей отсутствует. Это объясняется тем, что в это время работы дизеля и нормального протекания процессов изнашивания в деталях ЦПГ скорость поступления Fe в ОЦМ остается практически неизменной. Здесь влияние на интенсивность изнашивания оказывают другие эксплуатационные факторы, такие, как параметры внутрицилиндрового рабочего процесса, характер и условия нагружения дизеля, условия смазывания, качество и дозировка цилиндрического масла. Кроме того, можно сделать заключение о том, что именно техническое состояние поршневых колец в первую очередь определяет содержание продуктов износа в пробах масла подпоршневых полостей.

Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы. Разработана методика скользящей интервальной оценки коэффициентов корреляции, позволяющая исследовать тренды взаимозависимости концентрации продуктов износа в ОЦМ и наработкой деталей ЦПГ крейцкопфных МОД. Выполненная оценка показала, что данные трибомониторинга в общем случае не позволяют прогнозировать остаточный ресурс триад трения, но с высоким уровнем достоверности распознают возникающие в трущихся деталях дефекты и отказы.

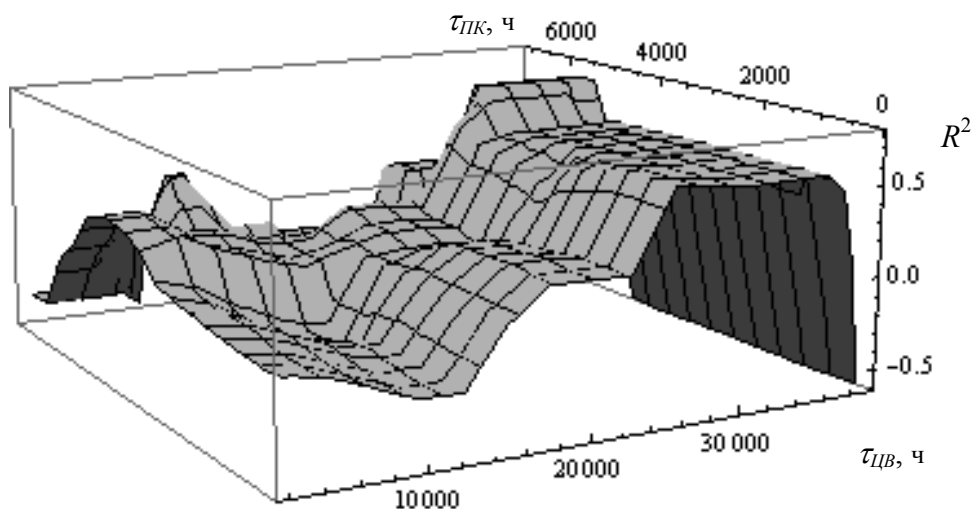


Рис. 1. Кинетические кривые коэффициентов корреляции времени работы цилиндра после моторочистки и наработки цилиндровой втулки

Fig. 1. Kinetic curves of factors of correlation of an operating time the cylinder after motor-cleaning and an operating time of the cylinder plug

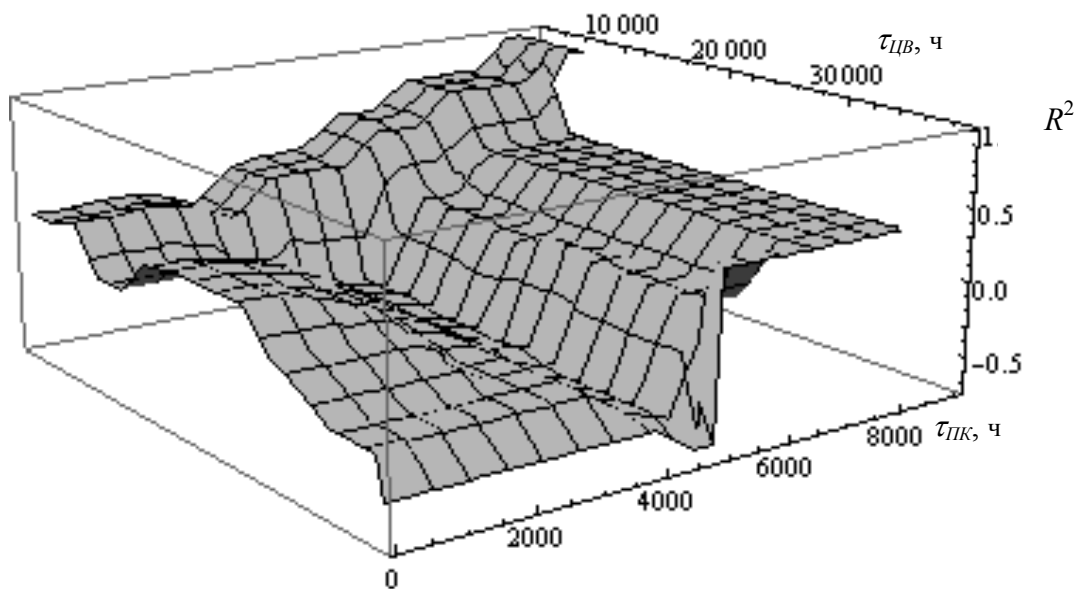


Рис. 2. Кинетические кривые коэффициентов корреляции наработки цилиндровой втулки и времени работы цилиндра после моторочистки

Fig. 2. Kinetic curves of factors of correlation of an operating time the cylinder plug and operating time of the cylinder after motor-cleaning

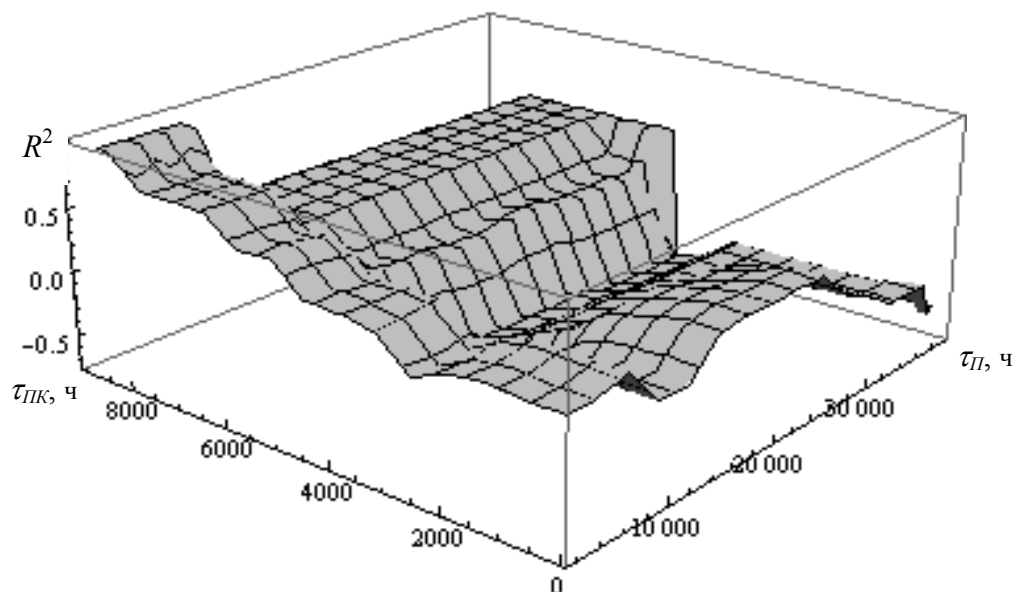


Рис. 3. Кинетические кривые коэффициентов корреляции наработки головки поршня и времени работы цилиндра после моторочистки

Fig. 3. Kinetic curves of factors of correlation of an operating time of a head the piston and an operating time of the cylinder after motor-cleaning

### Список литературы

1. Дубров А.М. Многомерные статистические методы [Текст] / А.М. Дубров, В.С. Мхитарян, Л.И. Трошин. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 352 с.
2. Надежкин А.В. Управление техническим состоянием цилиндропоршневой группы судовых крейцкопфных дизелей по результатам трибомониторинга [Текст] / А.В. Надежкин, В.Н. Даничкин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 1. – 210-212 с.
3. Погодаев Л.И. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин [Текст] / Л.И. Погодаев, В.Н. Кузьмин. – СПб.: Академия транспорта Российской Федерации, 2006. – 608 с.

**Сведения об авторах:** Надежкин Андрей Вениаминович, кандидат технических наук, доцент, e-mail: nadezkin@mail.ru.