

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ КРЕЙЦКОПФНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТРИБОМОНИТОРИНГА

А.В. Надежкин, к.т.н., доц.

Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского

По данным трибомониторинга установлена взаимосвязь между содержанием продуктов износа в отработанном цилиндрическом масле и состоянием объекта диагностирования — дизельного двигателя. Исследовано влияние различных марок цилиндрических масел на износ деталей цилиндро-поршневой группы судовых крейцкопфных дизелей. Даны практические рекомендации по обеспечению их ресурсосберегающей эксплуатации.



В процессе эксплуатации цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) крейцкопфных дизельных двигателей происходит непрерывное изнашивание поверхностей трущихся деталей. В зависимости от функционального назначения пар трения весь объем снимаемого с них в процессе изнашивания металла или часть его попадает в отработанное цилиндрическое масло (ОЦМ), которое накапливается в подпоршневых полостях дизеля. Поэтому отработанное цилиндрическое масло является ценнейшим носителем информации о техническом состоянии деталей ЦПГ крейцкопфного дизеля. Это свойство отработанного цилиндрического масла можно использовать для оценки текущего технического состояния трущихся пар и прогнозирования их остаточного ресурса [1, 2].

В настоящее время в системах технической диагностики нашли широкое применение логические модели [2, 3]. Применительно к задачам распознавания технического состояния судовых дизелей по содержанию продуктов износа в ОЦМ логическая модель устанавливает взаимосвязь между концентрацией в масле характерных химических элементов, входящих в состав трущихся сопряжений, и состоянием объекта диагностирования (ОД). При этом реализуется самый простейший случай — множество возможных состояний подвергается бинарному разбиению, при котором в состоянии дизеля различаются только два уровня: исправное или нет.

Решение данной дихотомической задачи применительно к деталям ЦПГ крейцкопфных

малооборотных дизелей (МОД) по результатам трибомониторинга возможно используя статистические методы идентификации состояния объекта диагностирования. Даже при неполном знании внутренних закономерностей изучаемых явлений можно получить пороговые значения диагностических параметров сложного объекта вне зависимости от их физической природы.

Для получения критериев исправное / неисправное состояние ЦПГ крейцкопфного дизеля был проведен судовой эксперимент. Объектом трибомониторинга являлся главный двигатель модели 6ДКРН74/160 ( $P_e = 8530$  кВт,  $n = 140$  об/мин) танкера «БАМ». Для обеспечения чистоты эксперимента начало трибомониторинга приурочили к выходу судна из ремонта, в котором была произведена замена всех деталей ЦПГ, подверженных изнашиванию, — цилиндрических втулок, поршней и комплектов поршневых колец [4].

Параллельно отбору проб ОЦМ производились замеры зазоров в кепках головок поршней. Концентрация железа Fe в ОЦМ длительное время (ориентировочно в течении 6 тыс. ч работы дизеля) оставалась практически неизменной (рис. 1). Однако увеличение зазоров в сопряжениях (рис. 2) интенсифицировало процесс изнашивания, что нашло свое проявление в значительном увеличении содержания Fe в ОЦМ. Предельная величина зазора в кепках этого дизеля составляет 0,65 мм. Из рис. 1 следует, что в канавке первого поршневого кольца он был превышен после наработки 6 тыс. ч.

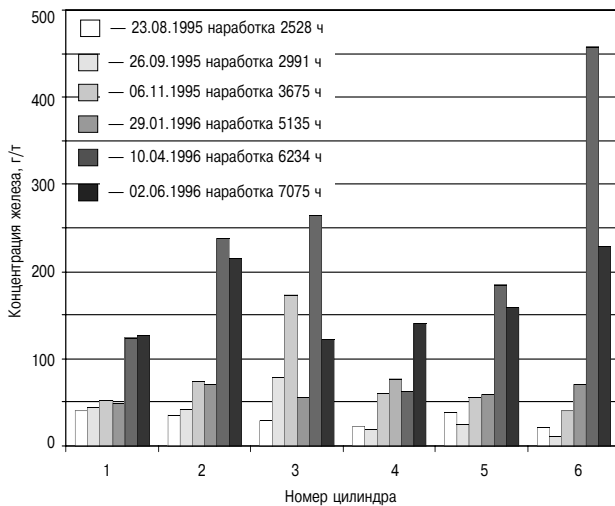


Рис. 1. Содержание продуктов износа в ОЦМ МОД при разной наработке цилиндров

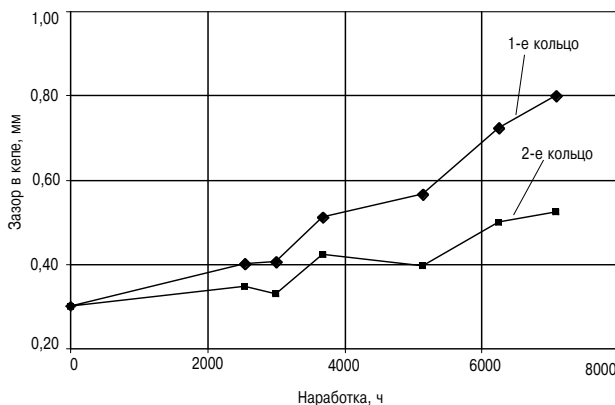


Рис. 2. Изменение осредненных по цилиндрам зазоров в кепках

Таким образом, фактически имеем две выборки данных. Первые 24 результата относятся к области исправного состояния, а остальные 12 характеризуют неисправное состояние деталей ЦПГ МОД, сопровождающееся повышенной скоростью изнашивания ее деталей.

Статистическая оценка экспериментальных данных трибомониторинга, выполненная в соответствии с рекомендациями работы [3], для двух экспериментальных выборок дала следующие результаты.

В области исправного состояния среднестатистическое содержание  $\bar{Fe}$  в отработанных пробах масла подпоршневых полостей составило 52 г/т, стандартное отклонение  $\sigma_{Fe}$  было равно 32,4 г/т, в то время как в области, соответствующей неисправному состоянию  $\bar{Fe} = 193,7$  г/т, а  $\sigma_{Fe} = 101,9$  г/т.

Используя методологию теории статистических решений [3], можно определить количественное значение величины концентрации  $Fe_0$ , соответствующего переходу объекта диагностирования из области исправного состояния  $D_1$  в область

неисправного состояния  $D_2$ . Задача состоит в том, чтобы выбор  $Fe_0$  был в некотором смысле оптимальным, например, давал наименьшее число ошибочных решений.

Как известно из теории технической диагностики, возможные ошибки при принятии решения получили название ложной тревоги и пропуск цели (дефекта) [2, 3].

Вероятность ложной тревоги  $P(H_{21})$ , т. е. случай, когда при  $Fe_i > Fe_0$  объект на самом деле является исправным, но рассматривается как дефектный. Вероятность ложной тревоги равна вероятности произведения двух событий: наличие исправного состояния и значения  $Fe > Fe_0$

$$P(H_{21}) = P(D_1)P(Fe > Fe_0/D_1) = P_1 \int_{Fe_0}^{\infty} f(Fe/D_1) dFe, \quad (1)$$

где  $P_1 = P(D_1)$  — априорная вероятность диагноза  $D_1$  (считается известной на основании предварительных статистических данных). Подобным образом находится и вероятность пропуска дефекта  $P(H_{12})$

$$P(H_{12}) = P(D_2)P(Fe > Fe_0/D_2) = P_2 \int_{Fe_0}^{\infty} f(Fe/D_2) dFe. \quad (2)$$

Вероятность принятия ошибочного решения складывается из вероятностей ложной тревоги и пропуска дефекта. В задачах определения действительного состояния ОД пропуск дефекта всегда менее предпочтителен, чем ложная тревога. Для того чтобы при статистической идентификации учесть этот момент, каждому из этих вероятностных событий дают «цену». Как правило,  $C_{12} > C_{21}$ , где  $C_{12}$  — предполагаемая цена ошибки последствия ложной тревоги, а  $C_{21}$  — соответственно пропуска дефекта. Если теперь учесть условные «цены» этих ошибок, то получим выражение для среднего риска

$$R = C_{21}P_1 \int_{Fe_0}^{\infty} f(Fe/D_1) dFe + C_{12}P_2 \int_{-\infty}^{Fe_0} f(Fe/D_2) dFe. \quad (3)$$

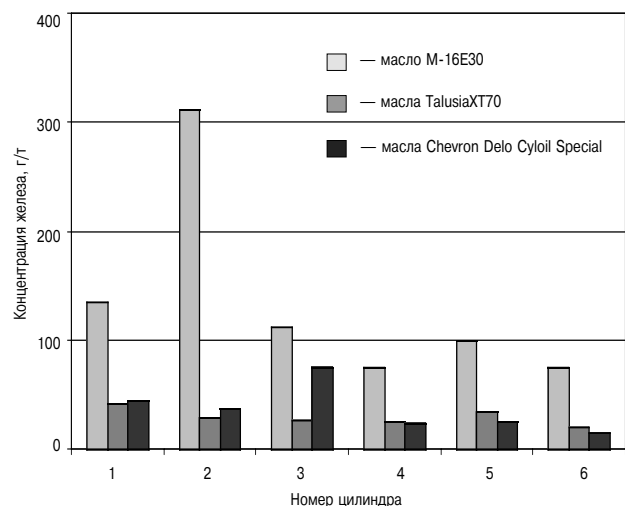
Далее по методу Ньютона–Пирсмана был выполнен расчет статистических оценок, используя формулы (1)–(3). Полученное решение дихотомической задачи распознавания технического состояния деталей ЦПГ МОД по данным трибомониторинга для наших экспериментальных выборок приведено ниже.

Пороговое значение  $Fe_0$  составило 85,7 г/т. При условии, что в пробах ОЦМ  $Fe_i > Fe_0$  с вероятностью 90,0 % можно утверждать — интенсивность изнашивания деталей ЦПГ МОД высокая. Необходимо установить причину и устранить дефекты в работе. Вероятность пропуска дефекта для полученного значения  $Fe_0$  равняется 5 %. Средний риск принятия решения составил 24,8 %, что является вполне удовлетворительным.

Таблица 1

**Сравнительные характеристики  
цилиндровых масел**

Марка масла	Вязкость при 100 °С, сСт	Щелочное число, мг КОН/г
М-16-Е <sub>2</sub> (30)	15–17	≥ 30
М-16-Е <sub>2</sub> (60)	15–17	≥ 60
М-20-Е <sub>2</sub> (70)	20–23	≥ 70
Mobilgard 570	19,5–20,5	≥ 70
Talusia XT-70	19,5–20,5	≥ 70
Chevron Delo Cyloil Special	19,5–20,5	≥ 70



**Рис. 3. Влияние масла типа цилиндрического на интенсивность изнашивания деталей ЦПГ**

Выполненная статистическая идентификация технического состояния ОД по содержанию продуктов износа в ОЦМ позволяет перейти к решению практических задач обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации судовых

дизелей основываясь на данных трибомониторинга.

Примером может служить проведенные исследования оценки влияния типа цилиндрического масла на ресурсосберегающую эксплуатацию судового дизеля. Марки цилиндрических масел, получившие наибольшее распространение на флоте Дальневосточного бассейна, представлены в табл. 1, откуда следует, что применяемые цилиндрические масла можно разделить на две группы по вязкости. Первая имеет значение этого показателя, равное 15–17 сСт, а вторая — примерно 20 сСт.

Испытания проходили на дизеле 6ДКРН 74/160-3 ( $P_e = 8530$  кВт;  $n = 140$  об/мин). Двигатель прошел капитальный ремонт с заменой всех изнашиваемых деталей ЦПГ (цилиндрических втулок, поршней, комплекта поршневых колец). Испытания проводили после обкатки и приработки деталей двигателя. За период наблюдения в течение 820 ч дизель эксплуатировался на трех сортах цилиндрических масел.

На первом этапе испытаний использовалось масло М-16-Е<sub>2</sub>(30), на втором — Talusia XT-70 и на последнем — Chevron Delo Cyloil Special. Результаты анализа проб ОЦМ по цилиндрам представлены на рис. 3.

Как следует из представленных данных, наихудшие результаты получены на первом этапе. Среднестатистическое содержание продуктов износа в ОЦМ составляло 134 г/т против 31,6 и 32,7 соответственно на втором и третьем этапах испытаний.

Аналогичные результаты были получены при статистической обработке результатов анализов проб ОЦП с других судов. Исследовались

Таблица 2

**Данные трибомониторинга деталей ЦПГ МОД с разными типами цилиндрических масел**

Наименование судна	Тип главного двигателя	Марка масла	Наработка ЦПГ после ТО и Р, ч	Продукты износа, г/т
т/к «БАМ»	6ДКРН74/160-3	М-16-Е <sub>2</sub> (30)	2120	134
т/к «БАМ»	6ДКРН74/160-3	Talusia XT-70	2528	31,6
т/к «БАМ»	6ДКРН74/160-3	Chevron Delo Cyloil Special	2991	32,8
т/к «Березово»	6ДКРН74/160-3	М-16-Е <sub>2</sub> (30)	3120	160
т/к «Виллойск»	6ДКРН74/160-3	Chevron Delo Cyloil Special	3786	109
т/к «Каменск-Уральский»	6ДКРН74/160-3	М-16-Е <sub>2</sub> (30)	4126	810
т/к «Нагаево»	6ДКРН45/120-7	М-16-Е <sub>2</sub> (60)	1137	204
т/к «Венспилс»	6ДКРН45/120-7	М-16-Е <sub>2</sub> (60)	3680	458
т/к «Даугава»	6ДКРН45/120-7	Mobilgard 570	4989	20,7
т/х «В.Чаленко»	6KZ57/80	М-16-Е <sub>2</sub> (60)	7370	551
т/х «В.Чаленко»	6KZ57/80	М-20-Е <sub>2</sub> (70)	7520	85,3

различные типы дизелей, имеющие различную наработку после технического обслуживания. Данные трибомониторинга сведены в табл. 2. Они убедительно свидетельствуют о том, что скорость изнашивания деталей ЦПГ при применении масел М-16-Е<sub>2</sub>(30) и М-16-Е<sub>2</sub>(60) в несколько раз выше, чем при использовании цилиндрических масел, имеющих класс вязкости 20 (ГОСТ 17479.1–85) или SAE 50 (стандарт SAE J 300). Во всех этих случаях осредненная по цилиндрам величина Fe была выше его порогового значения Fe<sub>0</sub>. Данный факт однозначно указывает на то, что идет интенсивное изнашивание деталей ЦПГ, а техническое состояние дизеля классифицируется как неисправное.

Анализ представленных в табл. 2 данных позволяет выявить следующую интересную закономерность. У однотипных двигателей содержание Fe в ОЦМ было тем выше, чем больше составляла наработка дизелей. Так, у ГД танкера «БАМ» при использовании масла М-16-Е<sub>2</sub>(30) концентрация Fe в ОЦМ была выше в 4,2 раза по сравнению с вариантом работы дизеля на масле класса SAE 50. Нарботка деталей ЦПГ после моточистки здесь была примерно одинаковой и равнялась 2120 и 2520 ч соответственно. У ГД теплохода «В. Чаленко» при применении масла М-16-Е<sub>2</sub>(30) износ деталей ЦПГ вырос уже в 6,5 раз по сравнению с его работой на масле М-20-Е<sub>2</sub>(70). Но здесь наработка дизеля после моточистки была примерно в 3,2 раза выше, чем в предыдущем случае. Эти результаты трибомониторинга показали, что по мере наработки дизеля и увеличения зазоров в трущихся деталях ЦПГ, все больше проявляется негативное влияние пониженной вязкости цилиндрического масла на условия работы трибосопряжений, вызывая их интенсивный износ.

Подводя итог проведенным исследованиям, можно отметить следующее. Методами статистической идентификации в результате проведенных натурных испытаний установлено, что для судовых МОД пороговое значение концентрации железа в ОЦМ равно 108,1 г/т. Ее превышение с вероятностью 91,2 % указывает на ухудшение технического состояния объекта диагностирования и требует от обслуживающего персонала корректирующих действий. С учетом полученных статистических решений провели исследование влияния вязкости применяемых цилиндрических масел на интенсивность изнашивания деталей ЦПГ МОД. Установлено, что наилучшие результаты в эксплуатации по критерию «минимальная скорость изнашивания» достигаются при использовании цилиндрических масел, имеющих вязкость 19-21 сСт при 100 °С. При этом такие марки цилиндрических масел, как М-16-Е<sub>2</sub>(30), М-16-Е<sub>2</sub>(60) не удовлетворяют требованиям надежной и долговечной работы крейцкопфных дизелей (особенно длинноходовых) по своим вязкостно-температурным характеристикам.

#### Литература

1. *Возницкий И.В.* Практические рекомендации по смазке судовых дизелей. — СПб. : Моркнига, 2007. — 135 с.
2. Диагностирование судовых технических средств: Справочник / Е.С. Голуб [и др.]. — М. : Транспорт, 1993. — 150 с.
3. *Биргер И.А.* Техническая диагностика. — М. : Машиностроение, 1978. — 240 с.
4. *Надежкин А.В., Даничкин В.Н.* Управление техническим состоянием цилиндро-поршневой группы судовых крейцкопфных дизелей по результатам трибомониторинга // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2008. — № 1. — С. 210–212.