

## АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРИБОСИСТЕМЫ ШЕЙКА КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА–ВКЛАДЫШ ПОДШИПНИКА–СМАЗКА СУДОВЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

*Л.Б. Леонтьев, Дальневосточный федеральный университет,  
А.В. Надежкин, Морской государственный университет,  
В.М. Макаров, Дальневосточный федеральный университет,  
А.Г. Токликишвили, Морской государственный университет*

Представлены результаты исследования условий работы трибосистемы шейка коленчатого вала–вкладыш подшипника–смазка судовых среднеоборотных дизелей, эксплуатируемых на тяжелых и дистиллятных топливах. Показано влияние показателей работающего моторного масла и содержащихся в нем продуктов износа на интенсивность изнашивания пар трения. Даны практические рекомендации по повышению надежности работы узлов трения судовых дизелей.

Надежность современных дизельных двигателей по мере их форсирования, снижения удельной массы и роста экономичности во все большей степени ограничивается надежностью подшипников скольжения коленчатых валов. Почти все разработчики и изготовители форсированных дизелей, созданных в последние годы у нас в стране, в той или иной мере сталкивались с отказами подшипников коленчатых валов и с необходимостью длительной доводки дизелей по показателям надежности. Использование тяжелых сортов топлива вызывает увеличение скорости изнашивания антифрикционных слоев вкладышей подшипников, повышение вероятности их отказов и необходимость частой замены во избежание возможных аварийных ситуаций [1].

В процессе эксплуатации судовых дизелей возможно нарушение их нормального функционирования из-за отказа трибоузла шейка коленчатого вала–вкладыш подшипника, причинами которого являются повреждения и разрушения отдельных элементов, составляющих трибоузел.

Наиболее ответственной и дорогостоящей деталью трибоузла является коленчатый вал, который эксплуатируется в условиях значительных переменных нагрузок. Шейки вала подвержены трению скольжения при больших скоростях и высоких удельных давлениях. Принятие обоснованных мер по предотвращению возможных и фактических отказов коленчатого вала по-

зволяет обеспечить надежность и безопасность дизеля в целом.

Основные причины отказов коленчатых валов — износ и задиры шеек. Они происходят на всех типах дизелей независимо от твердости шеек. Задир шеек и расплавление антифрикционного слоя вкладышей, как правило, приводят к деформации коленчатых валов, реже — к поломке вала.

Наиболее распространенными дефектами шеек коленчатого вала являются износы, характеризующиеся отклонением формы и изменением размеров, образованием круговых рисок и царапин глубиной до 0,05 мм, реже встречаются задиры, трещины и точечная коррозия.

Установлено, что у 67,6 % коленчатых валов среднеоборотных дизелей (СОД), поступающих на восстановление, величины износов и отклонений формы шеек значительно меньше допускаемых. Однако риски и круговые царапины на шейках имеют 100 % коленчатых валов, задиры шеек — до 33 % валов (от одной до 8 шеек, в среднем 2–3 шейки), расплавление вкладышей и наволакивание металла на шейки — менее 5 % валов, пятна коррозии на шейках — до 10 % валов, имеют деформацию до 24 % валов.

Основными целями данной работы являются исследование и анализ условий работы трибосистемы шейка коленчатого вала–вкладыш–смазка судовых среднеоборотных дизелей, установление причин отказов подшипников коленчатых валов и определение путей повышения их надежности.

При работе дизеля в стационарном режиме между шейкой вала и вкладышем подшипника образуется динамически несущий слой масла, который предотвращает контактирование микронеровностей вала и вкладыша. В идеальном случае такая система может функционировать бесконечно долго при условии сохранения свойств смазки. Однако при пусках и остановках дизеля, резком увеличении нагрузки (например, при буксировочных операциях, траловом промысле, движении на малом ходу, швартовке или изме-

нении направления движения судна) удельное давление в подшипнике существенно возрастает, что приводит к увеличению нагруженности подшипника, снижению толщины масляного слоя и изменению режима смазки с жидкостного на полужидкостное или граничное и, соответственно, к увеличению скорости изнашивания как вкладыша, так и шейки вала. Условия, характеризующие нагруженность подшипника по всем основным параметрам, влияющим на нее, оцениваются безразмерным коэффициентом нагруженности [2]

$$\zeta = \frac{P\psi^2}{ld\mu\omega},$$

где  $P$  — внешняя нагрузка или реакция смазочного слоя;  $\psi$  — относительный зазор;  $d$  — диаметр шейки вала;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости смазки;  $\omega$  — угловая скорость.

Износ сопряженных поверхностей трибозула приводит к увеличению относительного зазора и, соответственно, к возрастанию нагруженности подшипника.

Интенсивность изнашивания поверхностей трения зависит от ряда факторов, определяемых особенностями конструкции двигателя, условиями его эксплуатации, техническим состоянием двигателя, качеством применяемого топлива и масла и т. п. На скорость изнашивания трибосопряжения шейки коленчатого вала—вкладыш подшипника большое влияние оказывают триботехнические свойства моторного масла: вязкость, концентрация механических примесей, их дисперсный состав, попадание топлива в смазку, угар масла и т. д.

Пусковой износ зависит от вязкости масла — смазочные материалы с малой вязкостью обеспечивают более низкий пусковой износ вследствие лучшего подтекания масла в зону трения. Однако для работы в установившемся режиме предпочтительно более вязкое масло.

Для определения влияния эксплуатационных свойств масел и типа топлива (тяжелое или дистиллятное) были проанализированы результаты исследования свыше 100 проб циркуляционного масла различных типов СОД, эксплуатирующихся на тяжелых сортах топлива (главные двигатели) и дистиллятных (вспомогательные двигатели) и имеющих различный срок работы масла, выполненные испытательной лабораторией «Химотология» МГУ им. адм. Г.И. Невельского в течение 2004–2013 гг.

Подконтрольная группа главных двигателей эксплуатировалась на маслах марок М-14-Д2 (шл 30), Лукойл Навиго 20/30, Aurelia XL 40/30, ВДГ-CAT DEO 15W-40, Shell Gardinia Oil 40.

Вязкость работающего масла изменяется в широких пределах, особенно у дизелей, эксплуа-

тирующихся на тяжелых сортах топлива  $\pm 23\%$ , для дизелей, работающих на дистиллятных топливах, вязкость меняется в меньших пределах,  $\pm 15\%$  (таблица, рис. 1). Резкие изменения вязкости связаны с доливом свежего масла в систему смазки дизеля, о чем свидетельствует соответствующее изменение щелочного числа масла (см. рис. 1). Причины изменения вязкости масла в процессе эксплуатации следующие.

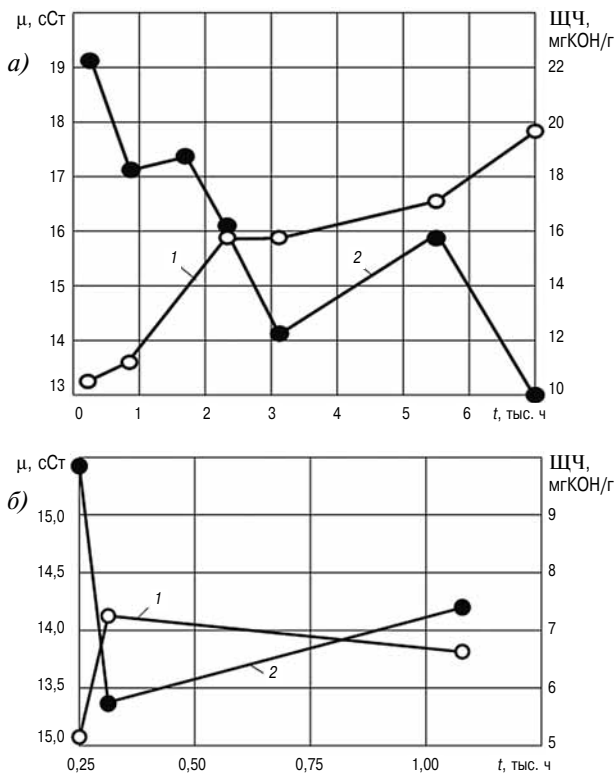
Вязкость моторных масел, в отличие от большинства других показателей, в процессе работы может как увеличиваться, так и уменьшаться, достигая соответственно верхнего и нижнего пределов. Рост вязкости масла может быть обусловлен накоплением в нем растворимых и нерастворимых продуктов окисления, срабатывания присадок, неполного сгорания топлива и масла, частиц металлов и пыли, испарением легких фракций основы, а также ошибочной доливкой масла большей вязкости. Он значительно ускоряется в присутствии катализаторов, роль которых в работавших моторных маслах играют частицы металлов и металлоорганические соединения — продукты изнашивания и коррозии

#### Величины значений характеристик работающего масла судовых СОД и содержание в нем продуктов износа и сгорания

Название параметра	Тяжелые топлива		Дистиллятные топлива	
	ТЗ	ПУ*	ТЗ	ПУ*
Вязкость при 100 °С, сСт	11,7–19,1 16,1	+30– (–20) %**	11,8–15,9 13,7	+30– (–20) %**
Щелочное число, мг КОН/г	4,7–28,5 20,3	10	3,1–14,4 8,0	2,5
Механические примеси, %	0,1–8,9 1,4	2,5	0,1–1,3 0,3	3,0
Химический элемент, мг/кг:				
железо (Fe)	0,2–35,0 8,2	> 50	0,0–72,8 15,4	> 25
алюминий (Al)	0,3–24,2 6,9	> 20	0,0–20,4 5,2	> 10
хром (Cr)	0,3–11,8 2,5	> 5	0,2–14,4 3,7	> 5
кремний (Si)	0,2–19,2 6,3	> 50	0,0–12,6 3,7	> 20
свинец (Pb)	0,1–34,3 4,5	> 5	0,0–18,5 6,8	> 5
олово (Sn)	0,4–55,1 13,1	> 5	0,0–25,2 4,8	> 5
медь (Cu)	<1,0–23,3 4,3	> 10	0,7–72,7 19,7	> 5

ТЗ — типичное значение; ПУ — предельный уровень.

Примечания: В числителе приведен интервал величины, в знаменателе — среднее значение. \* Величины предельного уровня химических элементов взяты из рекомендаций фирмы Wartsila NSD. \*\* Отклонение величины вязкости от первоначальной.



**Рис. 1.** Изменение вязкости (1) и щелочного числа (2) работающего масла в процессе эксплуатации СОД, работающих на тяжелых сортах топлива (а) и дизельных (б)

деталей двигателя. Уменьшение вязкости может быть обусловлено разжижением масла топливом, ошибочной доливкой менее вязкого масла [3, 4].

Вязкость дизельных моторных масел обычно растет из-за накопления нерастворимых продуктов, преимущественно частиц сажи от неполного сгорания топлива. Загущающее действие сажистых частиц может быть значительно уменьшено рациональным улучшением диспергирующих свойств масла. Из растворимых продуктов окисления и термоокислительных превращений структур основы масла наибольшее влияние на рост вязкости оказывают полициклические ароматические углеводороды, образующиеся в результате конденсации, а также продукты их взаимодействия с серой и азотом.

Уменьшение вязкости вследствие разжижения масла топливом может наблюдаться при неблагоприятных режимах эксплуатации (длительной работе на режимах холостого хода, периодической кратковременной работе с малыми нагрузками и частыми остановками при недостаточном прогреве охлаждающей жидкости и масла) или неисправности топливной аппаратуры. В масле, как правило, накапливается не топливо, а его тяжелые фракции, подвергшиеся предпламенному окислению, и жидкие углеводороды, подвергшиеся деструкции в процессе сгорания и адсорбировав-

шиеся на частицах сажи, попавших в масло. При работе дизеля на высоковязких тяжелых топливах разжижение масла не происходит, так как их вязкость зачастую превышает вязкость самого моторного масла. Однако следует иметь ввиду, что его эффективная вязкость в узлах трения, где имеет место высокий градиент скорости сдвига, будет недостаточным и считать такое мало работоспособным нельзя [3, 4].

Излишне высокая вязкость моторного масла судовых дизелей очень редко сопровождается увеличением интенсивности изнашивания пар трения. Повышение вязкости сказывается прежде всего на экономичности работы двигателя. Возрастают потери на трение и, как следствие, растет удельный эффективный расход топлива. Слишком малая вязкость приводит к падению давления в главной магистрали, уменьшению толщины масляной пленки, нарушению гидродинамического режима смазки тех сопряжений, которые рассчитаны на работу в таком режиме. Следствием работы на разжиженном масле являются: расплавление антифрикционного слоя вкладышей подшипников, задиры деталей цилиндропоршневой группы, поломки коленчатого вала и даже взрывы в картере.

Судовые моторные масла являются долгорботающими. Практически повсеместно их смена осуществляется по фактическому состоянию, а не по достижении определенной наработки. На основании сопоставления результатов лабораторного анализа основных физико-химических характеристик моторного масла с комплексом браковочных показателей технической менеджмент судоходной компании принимает решение о возможности дальнейшей работы масла в системе смазки дизеля. Таким образом, моторные масла судовых дизелей являются долгорботающими. Отсюда в процессе эксплуатации дизелей мы сталкиваемся с интенсивным массообменом в системе их смазки. Расход масла на угар компенсируется доливками свежего моторного масла. Количество доливов, особенно в системах смазки мощных судовых среднеоборотных дизелей, за весь срок службы масла может достигать нескольких сотен.

Итак, — долив масла обязательная процедура для нормальной работы двигателя. Количество доливаемого масла определяется его расходом. В реальных условиях эксплуатации ДВС наиболее характерным режимом работы системы смазки является периодический долив, когда контроль за уровнем масла в системе и долив производятся вручную обслуживающим персоналом с учетом расхода масла.

Периодичность и объем долива являются случайными функциями, определяемыми чело-

веческим фактором. С учетом нестационарного характера процесса долива его можно назвать стохастическим. Как следует из экспериментальных данных, наибольшее число случаев долива приходится на диапазон объемов до  $V_t = 5-15\%$  от среднестатистического объема масла в системе смазки дизеля  $V_c$ . Максимальный зафиксированный авторами объем доливаемого масла достигал 62 %.

Доливаемое в систему свежее масло приводит к временному снижению концентрации продуктов загрязнения в работающем масле. Причем здесь действует принцип адитивности. Концентрация снижается пропорционально количеству масла, доливаемого в систему смазки. Однако в последующем вследствие поступления продуктов загрязнения в систему смазки концентрация механических примесей в работающем моторном масле опять начинает возрастать.

Общепризнано утверждение, что 85–95 % загрязнений в моторном масле судовых дизелей имеют органическое происхождение [3]. При этом органические продукты в основном представляют собой частицы нагара, образующиеся в цилиндрах двигателя при сгорании топлива, а также при термическом разложении попадающего в камеру сгорания масла. Твердость частиц нагара может достигать 800 НВ и зависит от содержания серы в топливе [3]. Учитывая, что твердость металла основных деталей группы движения составляет в среднем 190–250 НВ, не вызывает сомнения то, что органические частицы в виде нагара способны вызвать существенный абразивный износ деталей дизелей.

Предельное содержание нерастворимого осадка зависит в основном от диспергирующих свойств масла. Чем они лучше, тем большее количество нерастворимого осадка может удерживаться в масле без выпадения шлама и образования отложений. Многочисленные наблюдения показали, что загрязнение масла механическими примесями до 3 % (дизели средней и повышенной частоты вращения) и до 2 % (быстроходные) не опасно, если диспергирующая и стабилизирующая способности масла высоки. Нерастворимые продукты в этом случае находятся во взвешенном мелкодисперсном состоянии и не могут вызвать интенсивного износа и загрязнения деталей двигателя или выпасть в осадок и таким образом заблокировать поры фильтровального материала и привести к низкому сроку службы фильтрующих элементов средств очистки [3].

Превышение указанных пределов чаще всего приводит к ухудшению противозносных свойств масла и повышению склонности к образованию отложений на деталях двигателя и фильтрующих элементах масляных фильтров. Ухудшение про-

тивоизносных свойств связано, с одной стороны, с адсорбцией продуктов разложения противозносных присадок на частицах сажи и, следовательно, дефицитом этих продуктов на трущихся металлических поверхностях тяжело нагруженных деталей двигателей, а с другой стороны, с абразивным действием нерастворимых частиц.

Абразивный износ деталей ДВС происходит вследствие попадания твердых частиц загрязнений в слой жидкой смазки, разделяющей поверхности трения. С увеличением концентрации грубодисперсной фазы (ГДФ) и размеров частиц в моторном масле растет износ деталей двигателя. Под ГДФ понимается наличие в моторном масле частиц загрязнений размером более 3–5 мкм, соизмеримых с зазорами в парах трения, вызывающие абразивное изнашивание.

Таким образом, работающее моторное масло из системы смазки судового дизеля несет в себе информацию о термодинамических, химических и триботехнических процессах, происходящих в парах трения двигателя. Носителями этой информации являются как физико-химические показатели самого масла, так и содержащиеся в нем продукты износа трущихся деталей дизеля. Информация о концентрации частиц износа в масле позволяет решать задачи распознавания технического состояния судовых дизелей, определять причины возникновения дефектов и отказов в их работе.

Такие элементы, как алюминий, железо, олово, свинец, медь и кремний, которые являются диагностическими параметрами, отражают состояние структурных параметров дизеля, а также изменение величин зазоров в трибосопряжениях [3].

У тронковых двигателей масло с зеркала цилиндра сбрасывается в картер, даже если они имеют лубрикаторные системы смазки. Поэтому продукты износа всех деталей тронкового дизеля накапливаются в его циркуляционной системе. Пути поступления металлов в циркуляционное масло следующие:

➤ Cu, Pb, Sn, Al — это продукты износа рамовых, мотылевых и головных подшипников скольжения, Al также поступает в результате износа поршней из алюминиевых сплавов;

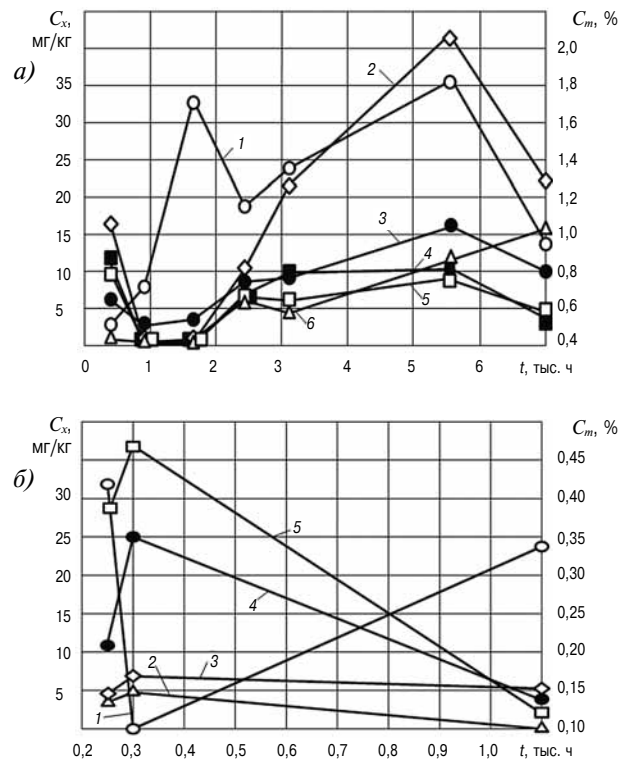
➤ Al и Si — попадают в масло с продуктами неполного сгорания топлива.

Установлено (см. таблицу), что количество механических примесей и продуктов износа в работающем масле СОД существенно зависит от топлива, на котором работает дизель, — тяжелое или дистиллятное. При работе дизелей на тяжелых сортах топлива в моторном масле значительно больше механических примесей (примерно в 4,7 раза), а также алюминия (в 1,3 раза),

кремния (в 1,7 раза) и олова (в 2,7 раза) по сравнению с моторным маслом двигателей, работающих на дистиллятном топливе. Более высокое содержание алюминия и кремния объясняется поступлением их в моторное масло в результате сгорания топлива. При работе дизелей на дистиллятных сортах топлива в моторном масле значительно больше железа (примерно в 1,9 раза), а также свинца (в 1,5 раза) и меди (в 4,6 раза). Более высокое содержание меди и свинца связано с тем, что в СОД, эксплуатирующихся на дистиллятных сортах топлива, установлены преимущественно трехслойные стале-бронзово-гальванические вкладыши, имеющие толщину антифрикционного слоя всего 0,02–0,04 мм [1]. Для среднего слоя применяются следующие бронзы: Z30 (BrС30) и CuPb22Sn, а гальванический слой (сплав на основе свинца) PbSn18Cu2. Последний в условиях трения при граничной или полужидкостной смазках быстро изнашивается, поэтому часто подшипник работает в паре трения сталь–бронза, которая характеризуется резким возрастанием как коэффициента трения, так и скорости изнашивания шейки коленчатого вала. Поэтому при повышенном содержании меди и свинца в смазочном масле (продукт износа бронзы) всегда наблюдается повышенное содержание железа.

Следует отметить, что изменения содержания механических примесей и продуктов изнашивания не всегда совпадают между собой (рис. 2). Это зависит от степени дисперсности продуктов загрязнения моторных масел. При высоком уровне моюще-диспергирующих свойств в масле преобладает мелкодисперсная фаза механических примесей, размер которых меньше минимальной толщины масляного клина в парах трения и поэтому абразивный износ незначителен даже при высоком значении величины механических примесей. По мере срабатывания присадок доля ГДФ возрастает, что вызывает более интенсивное изнашивание. Установлено, что при снижении диспергирующе-стабилизирующей способности моторных масел пропорционально увеличивается концентрация в работающем масле ГДФ [3]. Отсюда даже при меньшем уровне загрязненности масла износы оказываются выше.

Резкие уменьшения количества механических примесей и продуктов износа в работающем масле СОД связаны с изменениями щелочного числа масла (см. рис. 1 и 2), которое при этом увеличивается. Это говорит о том, что доливали свежее масло в систему смазки. Между доливками масла содержание механических примесей и продуктов износа в работающем масле растет, причем более интенсивно у двигателей, работающих на тяжелых сортах топлива. Изменения



**Рис. 2. Изменение содержания механических примесей и продуктов изнашивания в работающем масле в процессе эксплуатации СОД, работающих на тяжелых сортах топлива (а) и дистиллятных (б):**

1 — механические примеси; 2 — алюминий (Al); 3 — олово (Sn); 4 — железо (Fe); 5 — медь (Cu); 6 — кремний (Si)

содержания продуктов износа в работающем масле СОД (см. рис. 2) совпадают по времени и имеют возрастающий характер.

Анализ распределения количества механических примесей в работающем масле СОД, работающих на тяжелых сортах топлив, позволил установить, что у 40,4 % двигателей количество механических примесей приходится на интервал 0,51–1,0 мг/кг (рис. 3, а), высоким оно остается до величин 3,0–3,5 мг/кг, поэтому средняя величина довольно высока и составляет 1,4 мг/кг.

Количество механических примесей в работающем масле СОД, работающих на дистиллятных сортах топлива существенно меньше, причем у 60 % двигателей содержание механических примесей приходится на интервал 0,10–0,25 мг/кг (рис. 3, б), а содержание механических примесей величиной более 0,51 мг/кг незначительно и составляет всего 2,2 % во всех последующих диапазонах.

Анализ распределения количества продуктов изнашивания в работающем масле СОД позволил установить, что вне зависимости от вида используемого топлива их содержание у большинства дизелей находится в интервале 0,1–5,0 мг/кг (рис. 4, а и б), то есть в пределах нормы.

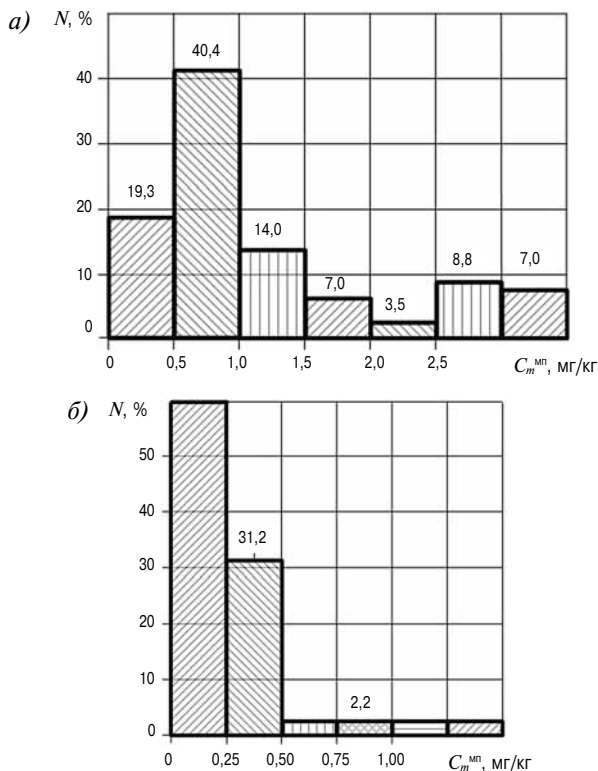


Рис. 3. Распределение количества механических примесей в работающем масле СОД, работающих на тяжелых (а) и дистиллятных (б) сортах топлива

Установлено, что у 40 % дизелей, работающих на тяжелых сортах топлива, количество олова приходится на диапазон 5–10 мг/кг (рис. 4, а), что говорит о высоких скоростях изнашивания антифрикционного покрытия вкладышей. Следовательно, можно сделать вывод, что применение гальванических подшипников не целесообразно в двигателях, работающих на тяжелых сортах топлива, из-за их низкой износостойкости.

Распределение количества продуктов изнашивания меди и железа в работающем масле СОД вне зависимости от вида используемого топлива практически совпадают.

Следует отметить, что у 24 % дизелей, работающих на дистиллятных сортах топлива, наблюдается повышенное содержание алюминия — диапазон содержания 30–35 мг/кг (рис. 4, б). Алюминий в работающем масле находится в виде окислов, обладающих наиболее высокой твердостью (твердость по Виккерсу 19–21 ГПа). Частицы  $Al_2O_3$  приводят к интенсивному абразивному изнашиванию поверхностей трибосопряжения шейки вала–вкладыш подшипника в условиях трения при граничной или полужидкостной смазках, когда размер абразивных частиц превышает масляный зазор в подшипнике. Установлено, что между суммарным количеством металлов, входящих в состав антифрикционных материалов подшипников скольжения, и нахо-

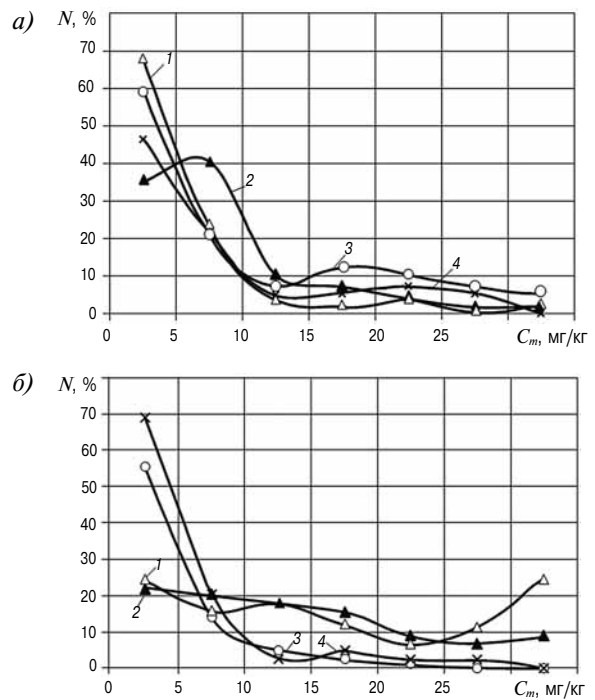


Рис. 4. Распределение продуктов износа в работающем масле СОД, работающих на тяжелых (а) и дистиллятных сортах топлива (б):

1 — алюминия; 2 — олова; 3 — меди; 4 — железа

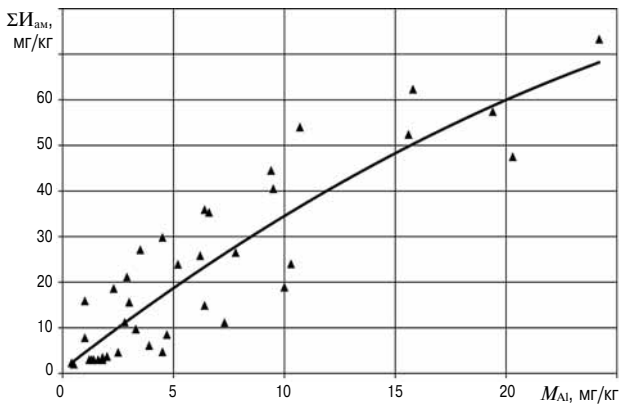
дящихся в работающем масле, и алюминием существует зависимость (рис. 5), которая описывается выражением ( $R^2 = 0,815$ )

$$\Sigma И_{а.м} = -0,057 M_{Al}^2 + 4,08 M_{Al} + 0,087,$$

где  $\Sigma И$  — суммарная масса металлов, входящих в состав антифрикционных материалов подшипников скольжения, а именно: олова, свинца и меди, мг/кг;  $M_{Al}$  — масса алюминия в работающем масле, мг/кг.

Из уравнения следует, что увеличение массы алюминия в работающем масле приводит к интенсификации изнашивания вкладышей подшипников и шеек коленчатого вала, что ведет к увеличению параметров шероховатости шеек, схватыванию и задирам, поэтому для повышения долговечности деталей трибоузла содержание алюминия должно быть ограничено 5-ю мг/кг в работающем масле. Однако в настоящее время величины предельных уровней алюминия для дизелей, эксплуатирующихся как на тяжелых, так и дистиллятных сортах топлива, необоснованно значительно завышены (см. таблицу), что приводит к снижению долговечности дизелей.

Элементы хрома и кремния на процесс изнашивания поверхностей трибосопряжения шейки вала–вкладыш подшипника не оказывают существенного влияния вследствие того, что в результате их химической реакции со щелочью, находящейся в масле, образуются соли этих элементов.



**Рис. 5. Зависимость суммарного содержания металлов, входящих в состав антифрикционных материалов подшипников скольжения, от содержания алюминия в работающем масле**

Для повышения надежности и уменьшения вероятности аварий судовых СОД рационально проводить модифицирование шеек вала природными или искусственными силикатами для получения металлокерамического износостойкого покрытия, позволяющего избежать задира, снизить энергетический уровень контактного взаимодействия трущихся поверхностей и величину износа трибосопряжения шейки вала–вкладыш [5].

Таким образом, на основании проведенных исследований были установлены основные факторы, оказывающие влияния на интенсивность изнашивания трибосистемы шейки коленчатого вала–подшипник скольжения. Из полученных результатов следует, что значительный резерв в минимизации процесса изнашивания заключен в оптимизации срока использования моторного масла. Вопрос определения наработки дизеля до замены масла весьма сложен. Необоснованное завышение срока службы масла может привести к негативным последствиям: повышенному износу и нагаро- и лакообразованию деталей дизеля. Поэтому, переходя к смене масла по фактическому состоянию, надо не просто ориентироваться на достижение одного из показателей работающего масла браковочного уровня, а рас-

сматривать этот вопрос комплексно с учетом интенсивности изнашивания пар трения, которая оценивается по содержанию продуктов износа в работающем моторном масле. Кроме того, полученные результаты убедительно показывают, что комплекс браковочных показателей необходимо дополнить. Следует включить в него ограничения по содержанию алюминия.

Другой путь обеспечения ресурсосберегающей эксплуатации судовых дизелей — повышение качества и эффективности очистки моторного масла за счет разграничения функций агрегатов очистки. Необходимо использовать такие сочетания средств очистки, чтобы наиболее полно реализовывались преимущества полнопоточного фильтрования для защиты пар трения двигателя от крупных абразивных частиц и центрифугирования для глубокой очистки масла от тонкодиспергированных, нерастворимых примесей, в том числе продуктов износа [3]. Это приводит к снижению доли ГДФ в масле и, как следствие, снижению интенсивности изнашивания пар трения, создавая комфортные условия функционирования трибосопряжений.

#### Литература

1. Леонтьев Л.Б. Подшипники коленчатых валов судовых дизелей / Л. Б. Леонтьев, А. Д. Юзов. — Владивосток: ДВГМА, 2000. — 173 с.
2. Коровчинский М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения / М.В. Коровчинский. — М.: Машгиз, 1959. — 403 с.
3. Кича Г.П. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях / Г.П. Кича, Б.Н. Перминов, А.В. Надежкин. — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. — 372 с.
4. Резников В.Д. Критерии работоспособности моторных масел / В.Д. Резников, Э.Н. Шипулина // Химия и технология топлив и масел. — 1989. — № 9. — С. 24–28.
5. Леонтьев Л.Б. Причины отказов коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей и пути повышения их надежности / Л. Б. Леонтьев, А. Г. Токликишвили // Вестник инженерной школы ДВФУ. — 2012. — № 3. — С. 40–47.