

Рис.1. Схемы контактирования поверхностей при граничном трении: 1 — твердый металл; 2 — мягкий металл; 3 — тонкая подложка из мягкого металла; a — движение твердого металла по мягкому;  $\delta$  —движение твердого металла по твердому;  $\epsilon$  — движение твердого металла по твердому через тонкую мягкую подложку

верхности и нанесение антифрикционного покрытия) в каждом случае может зависеть от особенностей конструкции, преимущественных режимов ее работы, а также физико-химических свойств материалов пары трения. Одним из итоговых показателей качества модификации должна быть надежная адгезия (сцепление) антифрикционного покрытия по отношению к упрочненной поверхности в условиях ударного характера движения поршня и значительных колебаний температуры вдоль его образующей.

#### Литература:

- 1. Путинцев С.В. Анализ режима трения деталей цилиндро-поршневой группы автомобильного дизеля//Известия вузов. Машиностроение.-1999.-№2-3.-С.65-68.
- 2. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов/Э.Д. Браун, Н.А. Буше, И.А. Буяновский и др./Под ред. А.В. Чичинадзе.-М.: Центр Наука и техника, 1995.-778с.
- 3. Трение и граничная смазка: Сб. статей под ред. проф. И.В. Крагельского.-М.: Изд-во Иностранной литературы, 1953.-288с.

# РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЕ МАСЛОИСПОЛЬЗОВАНИЕ В СУДОВЫХ ТРОНКОВЫХ ДИЗЕЛЯХ ПРИ ИХ РАБОТЕ НА ТОПЛИВАХ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

## Кича Г.П., Перминов Б.Н., Гаук А.А., Коломеец Ю.М.

(Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток)

Расширение топливной базы ДВС предполагает применение в дизелях средней и повышенной частоты вращения тяжелых высоковязких топлив, что усложняет функционирование их систем смазки. Углубление переработки нефти неизбежно сопровождается увеличением концентрации в топливах продуктов вторичных процессов. В последних содержится значительное количество нежелательных соединений, ухудшающих эксплуатацию дизельных двигателей. Этот недостаток характерен и для топлив, получаемых из альтернативного сырья.

Приспособление дизелей к применению топлив с пониженными показателями качества, особенно при необходимости повышения эксплуатационной экономичности и надежности ДВС, может решаться только совместными усилиями конструкторов и изготовителей двигателей, эксплуатационников, а также специалистов по топливам и маслам.

Проблема эффективного маслоиспользования на судах приобрела особую остроту в связи с необходимостью экономии и рационального использования топливно-энергетических ресурсов на морском транспорте путем вовлечения продуктов глубокой переработки нефти и альтернативного сырья в товарные продукты. В МГУ им. адм. Г.И. Невельского разработана программа научно-исследовательских работ, направленных на повышение ресурса ДВС и экономию горюче-смазочных материалов (ГСМ) при конвертировании судовых тронковых дизелей на низкосортные топлива. Поставлена задача довести ресурсные показатели форсированных ДВС средней и повышенной частоты вращения при работе на флотских и топочных мазутах до значений, характерных при использовании дизельного топлива. Большое внимание было уделено обеспечению ресурсосберегающего маслоиспользования на судах.

Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых форсированных дизелях достигнуто разработкой:

- новых научно-технических решений, направленных на сокращение угара и увеличение срока службы моторного масла (ММ), повышение при работе на низ-косортных топливах ресурсных показателей и надежности дизелей;
- комбинированных маслоочистительных комплексов, в том числе саморегенерирующегося типа, одновременно обеспечивающих надежную защиту пар трения дизеля от абразивного изнашивания, торможение старения и стабилизацию угара масла;
- водостойких судовых MM многоцелевого назначения и унификацией их на основе присадок MACK, ПМС с добавками модификаторов трения, способствующих экономии MM и снижению изнашивания деталей ДВС;
- мероприятий по поддержанию угара MM на уровне, при котором его расход, изнашивание, нагаро- лакообразование деталей ДВС минимальны;
- системы рационального маслоиспользования, реализация которой позволяет значительно сократить расход ГСМ и сменно-запасных частей и увеличить ресурсные показатели дизелей.

Улучшение моторных свойств унифицированных масел осуществлялось за счет подбора композиций многофункциональных и специального назначения присадок, обеспечивающих хорошую сбалансированность нейтрализующих, моюще-диспергирующих и противоизносных свойств ММ. Достигнута высокая водостойкость и низкая вымываемость присадок при обводнении масла.

Детергенты и дисперсанты подобраны к маслу так, чтобы дисперсная фаза нерастворимых загрязнений хорошо удалялась центрифугированием и не вызывала повышения вязкости масла и полировки цилиндровых втулок. При этом уг-

леродистые отложения на деталях цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) накапливались в незначительных количествах. Низкотемпературные отложения в картере дизеля и в элементах смазочной системы (СС) отсутствуют полностью.

Для дизелей, работающих с высокой долей переходных режимов и холостого хода, предложена композиция присадок, дополнительно включающая термостойкие сукцинимиды и маслорастворимые модификаторы трения (МТ), которые улучшают функционирование дизеля при низкотемпературных режимах смазки и работе с низким угаром и маслообменом при редком доливе свежего масла.

С целью подбора унифицированного ММ, отвечающего требованиям дизеля с учетом качества применяемого топлива, разработана модель комплекса «дизель – эксплуатация – топливо – масло – очистка» (ДЭТМО). Она позволяет идентифицировать функционирование входящих в нее звеньев, вести оценку соответствия их друг другу и осуществлять выбор масла и очистителя, задавать угар ММ, обеспечивающих ресурсосберегающее маслоиспользование. Эта модель дает возможность оптимизировать состав комплекса ДЭТМО с достижением минимального расхода ММ и высоких ресурсных показателей ДВС при сжигании топлив глубокой переработки нефти.

Обобщение результатов моделирования и моторных испытаний комплекса ДЭТМО позволило рекомендовать для подбора масел зависимость:

$$c_{\pi} = 0.97 + 9.3 \, K_{T} + 2.8 \, p_{me}$$

где  $c_{\pi}$  — концентрация присадок в MM, % масс.;  $K_{\tau}$  — показатель качества топлива, отн. ед.;  $p_{me}$  — среднее эффективное давление дизеля на основном эксплуатационном режиме работы, МПа.

Качество применяемого топлива задавалось показателем  $K_{\text{\tiny T}}$ , который варьировался в пределах 0,2–1,8, что соответствовало дизельному топливу Л-0,2-61 (ГОСТ 305-82) и топочному мазуту М-100 (ГОСТ 10585-75).

Показатель  $K_{\scriptscriptstyle T}$  рассчитывался по формуле:

$$K_{T} = A_{3} \frac{3_{T}}{3_{T6}} + A_{S} \frac{S_{T}}{S_{T6}} + A_{\varphi} \frac{\Phi}{\Phi_{6}} + A_{\Gamma} \frac{\Gamma}{\Gamma_{6}},$$

где  $A_i$  – коэффициенты весомости;  $3_{\scriptscriptstyle T}$ ,  $3_{\scriptscriptstyle T6}$  – зольность топлива, %;  $S_{\scriptscriptstyle T}$ ,  $S_{\scriptscriptstyle T6}$  – содержание серы, %;  $\Phi$ ,  $\Phi_6$  – фракционный состав топлива, отн. ед.;  $\Gamma$ ,  $\Gamma_6$  – групповой состав топлива, отн. ед. Индекс Б соответствовал базовому топливу.

Фактор  $K_{\scriptscriptstyle T}$  представляет собой средневзвешенную величину вышеназванных показателей, взятых относительно базового топлива с коэффициентами весомости 0,25. Базовым принято топливо с показателями:  $3_{\scriptscriptstyle T6}$  = 0,1 %,  $S_{\scriptscriptstyle T6}$  = 2 %,  $\Phi_6$  = 0,4,  $\Gamma_6$  = 0,5. Характеристики топлива  $\Phi$  и  $\Gamma$  определялись соответственно долей топлива, выкипающего при температуре выше 350 °C, и суммарным относительным содержанием асфальто-смолистых веществ и ароматической группы углеводородов в топливе.

В результате моделирования и судовых испытаний комплекса ДЭТМО разных составов установлено:

- унифицированные MM должны подбираться к CC дизелей с учетом их форсировки и качества применяемых топлив;
- наибольший эффект в тронковых среднеоборотных дизелях получен при использовании ММ с композицией присадок МАСК и ПМС в соотношении 3:2 при общей их концентрации 6–24 % и щелочности 6–40 мг КОН/г;
- для дизелей с  $p_{me}$  до 1 МПа при сжигании топлива с  $K_{\rm T}$  = 0,2–0,5 рационально использование ММ с концентрацией присадок 6–8 % и уровнем щелочности 6–10 мг КОН/г; при  $p_{me}$  = 1–1,5 МПа и  $K_{\rm T}$  = 0,6–1,2 рассматриваемые показатели

должны соответствовать 8-13 % и 10-20 мг КОН/г; при  $p_{me} = 1,5-2,2$  МПа и  $K_{\rm T} = 1,3-1,8$  наибольший экономический эффект может быть получен при работе на ММ с  $c_{\rm H} = 13-24$  % и щелочностью 20-40 мг КОН/г.

Исследование взаимодействия МТ различного механизма действия с многофункциональными присадками и удаления их агрегатами очистки масел позволило ранжировать модификаторы по топливо- и ресурсосберегающему действию. Применение МТ приводит к положительному эффекту по всему спектру эксплуатационных свойств ММ, что сказывается в снижении на 30–60 % износа цилиндровой втулки в верхнем поясе и на 3–12 г/(кВт·ч) расхода топлива, облегчает холодный пуск дизеля и уменьшает потери на трение.

МТ при добавке к ММ не ухудшают их основных свойств, так как усиливают действие большинства присадок, в том числе многофункциональных, входящих в масла с высокими эксплуатационными свойствами. Модификаторы «выравнивают» эпюру износа цилиндровых втулок, стабилизируют угар масла на нижнем уровне в течение длительного периода и способствуют ресурсосберегающему маслоиспользованию в дизелях.

По результатам моделирования эффективности МТ в судовых тронковых дизелях выявлено:

- наиболее рациональна добавка их в унифицированные масла в количестве 2-3 % масс.;
- эффективность модификаторов, проявляемая в снижении изнашивания деталей дизелей и в топливосбережении, возрастает при увеличении форсировки дизеля наддувом и частоты вращения, продолжительности его работы на переменных режимах, в том числе с перегрузкой, а также при увеличении числа «холодных» пусков.

Для использования в судовых форсированных тронковых дизелях разработаны комбинированные системы тонкой очистки масла (КСТОМ). Новизна их состоит в:

- последовательном соединении двух контуров очистки, использующих разные по принципу действия и избирательности отсева маслоочистители;
- установке на полном потоке в СС для надежной защиты пар трения дизеля от опасных крупных частиц загрязнения фильтра со сменными фильтрующими элементами (ФЭ) или регенерирующегося типа;
- подключении центрифуги с напорным сливом в откачивающую магистраль с возможностью поддержания за счет подпорного клапана высокого давления масла перед соплами гидропривода ротора и, следовательно, фактора разделения центробежного очистителя (ЦО) при работе дизеля по винтовой характеристике;
- подаче на фильтр предварительно центрифугированного масла для снижения «грязевой» нагрузки на него и увеличения срока службы ФЭ;
- использовании в ЦО переливного клапана, автоматически регулирующего поток через его ротор для достижения максимальной интенсивности очистки и минимальной старения масла;
- поддержании постоянного давления MM перед его потребителями установкой на основном насосе дроссельного распределителя с обратной связью.

Для дизелей с высокой прокачкой масла через СС предложена система его очистки с саморегенерирующимся (полнопоточным) фильтром (СРФ) и центрифугой. Особенностью КСТОМ является подключение ЦО для очистки промывного масла СРФ, дисперсная фаза загрязнений которого укрупнена и легко отфуго-

вывается. Для повышения регенерирующей способности фильтра путем снижения гидравлического сопротивления промывного потока ЦО выполнен с напорным сливом и имеет автономный подвод масла на гидропривод от магистрали в СС, где давление жидкости самое высокое.

Комбинированная очистка масла фильтрованием и центрифугированием стабилизирует моюще-диспергирующие свойства масел на более высоком уровне, длительно сохраняет солюбилизирующую способность некоторых из них, ускоряет перевод промежуточных продуктов окисления в карбены и карбоиды, которые легко удаляются центрифугированием. Очистка ММ фильтрованием и центрифугированием наиболее эффективна при применении зольных масел с высокими моюще-диспергирующими свойствами и топлив с содержанием серы более 1 %. КСТОМ длительно, в течение 8–12 тыс. ч, стабилизирует изнашивание дизеля и угар масла на нижнем уровне.

Для совершенствования маслоиспользования с позиций сокращения расхода ММ в тронковых дизелях проведен комплекс исследований по оценке влияния угара  $g_y$  масла на его старение и состояние дизеля. В результате моделирования и моторных испытаний выявлен угар 1-3 г/(кВт·ч), при котором обеспечиваются самые высокие технико-экономические показатели судовых тронковых ДВС.

Комплексное повышение эффективности СС при работе на высоковязких нефтепродуктах способствует достижению минимального расхода ММ и ресурса ДВС, характерного для сжигания дистиллятных топлив. При этом значительно повышается надежность работы тронковых дизелей.

На Дальневосточном бассейне реализованы следующие методы сокращения угара масла в дизелях:

- применение поршней с минимально допустимыми зазорами по втулке цилиндра и с оптимальной геометрией боковой поверхности, в том числе овальнобочкообразной формы;
- использование для изготовления поршней материалов с малым коэффициентом линейного расширения;
  - снижение температуры поршней за счет их интенсивного охлаждения;
- выбор оптимальных профилей, расположения и количества поршневых колец;
- использование маслосъемных колец с заданной эпюрой радиальных давлений, с экспандерами, минутных, торсионных и др.;
- применение новых материалов и антиизносных покрытий при изготовлении колец.

Разработаны эксплуатационные мероприятия по сокращению расхода масла в дизелях. Основными из них являются:

- применение масел с повышенными вязкостью и индексом вязкости, а также низкой испаряемостью;
- оптимизация концентраций многофункциональных присадок в масле с учетом качества топлива и форсировки дизеля;
- использование унифицированных масел с высокой термо- и водостойкостью и низкой эмульгируемостью, повышенными антиизносными, антикоррозионными и моюще-диспергирующими свойствами при соотношении щелочности к зольности 8–12;
- полнопоточная тонкая очистка MM фильтрованием с дополнительным центрифугированием его для торможения старения, что особенно важно при низком угаре масла.

Выявлено, что снижение угара ММ изменяет основные направления его старения. Интенсифицируется смолообразование и термоокислительная деструкция углеводородов, растет концентрация грубодисперсных и падает содержание мелкодисперсных примесей в масле, наблюдается его карбонизация. При увеличении угара более 3 г/(кВт·ч) усиливается коллоидное загрязнение масла нерастворимыми продуктами (НРП), в нем образуется больше кислородосодержащих и кислых продуктов окисления.

Исследование влияния угара на состояние дизеля показало, что в области  $g_y = 1,2-2$  г/(кВт·ч) его изнашивание протекает с наименьшей интенсивностью. Объясняется это лучшим состоянием масла, т.е. самыми благоприятными условиями для торможения его старения. Увеличение угара выше 2 г/(кВт·ч) приводит к интенсификации озоления ММ, росту концентрации в нем НРП и увеличению массы механических примесей, циркулирующих через трибосопряжения ЦПГ.

Длительными испытаниями на судах доказана возможность надежной ресурсосохраняющей эксплуатации тронковых форсированных дизелей при сжигании низкосортных топлив и работе на унифицированных маслах высокого функционального уровня с угаром 1,2-2 г/(кВт·ч). Разработаны мероприятия по стабилизации  $g_y$  на низком уровне в течение 8-12 тыс.ч работы ДВС за счет подбора ММ, отвечающих требованиям системы ДЭТМО, и использования комбинированных маслоочистительных комплексов.

В результате проведенных исследований осуществлено комплексное повышение эффективности СС судовых тронковых дизелей средней и повышенной частоты вращения, что дает возможность:

- сохранить или увеличить не менее чем на 15 % ресурсные показатели двигателей при конвертировании их на низкосортные топлива;
- затормозить за счет высокоэффективных многофункциональных присадок старение MM на уровне, позволяющем продлить его срок службы в 2–3 раза;
- сократить улучшением уплотнительного и маслосъемного действия поршневых колец угар масла в среднем на 30 %;
- уменьшить применением высокоэффективных КМОК в 1,3–2,4 раза интенсивность изнашивания основных деталей ДВС и на 30–70 % нагаро- и лакообразование в ЦПГ;
- стабилизировать присадками и эффективной очисткой основные эксплуатационные показатели ММ на уровне, обеспечивающем при угаре 1,2–2,5 г/(кВт·ч) перевод унифицированных масел в разряд долгоработающих.

# ЕВРО 4, ЕВРО 5 – КОНСТРУКЦИЯ ДИЗЕЛЕЙ И ТРЕБОВАНИЯ К МАСЛАМ

### А.Н. Тиняков

(ООО «Московский филиал Лубризол Гез.м.б.х»)

Европейский рынок моторных масел переживает период драматических изменений. Новые требования по ограничению вредных выбросов привели к изменению конструкции двигателей и систем доочистки выхлопных газов, расположенных в выпускном тракте, что потребовало разработки нового поколения масел, способных удовлетворять требованиям будущего.

В то же время, с момента введения требований по выбросам Евро 3 в 2000 го-