

УДК 621.436

Заблоцкий Ю.В., Сагин С.В.  
ОНМА

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПРИ ИХ РАБОТЕ НА РАЗЛИЧНЫХ ТОПЛИВАХ

В последние годы значительно усовершенствовались все судовые дизели, в том числе и среднеоборотные (СОД) [1]. В связи с этим изменились требования к качеству топлива, а также стало в большей степени проявляться влияние его эксплуатационных характеристик на эффективность топливоиспользования. Эксплуатационные свойства топлива влияют не только на энергетические и экономические параметры работы судового дизеля, но и непосредственно определяют его хранение, транспортировку, перекачку, подачу, а также развитие рабочего процесса.

Наиболее общими характеристиками качества топлива, которые в определенном сочетании характеризуют его вышеперечисленные эксплуатационные свойства, являются вязкость; плотность; содержание механических примесей, воды, смол; фракционный и структурный состав; температура вспышки; теплота сгорания; массовая доля общей серы. Стремление судовладельцев и чартерных компаний к снижению эксплуатационных затрат, приводит к максимально возможному использованию в судовой энергетике высоковязких сортов топлива с низкой стоимостью. При этом данные топлива характеризуются повышенным удельным весом и высоким содержанием сернистых соединений.

Немаловажным является также следующий факт, характеризующий изменение стратегии использования топлива в судовых СОД. Если в 90-х и на рубеже 2000-х годов судовые СОД (как главные, использующиеся для передачи мощности на винт, так и вспомогательные, обеспечивающие привод электрических генераторов) эксплуатировались исключительно на дизельном топливе с вязкостью 15...35 мм<sup>2</sup>/с, то подобные модели современных дизелей работают на топливах с вязкостью до 380 мм<sup>2</sup>/с. Кроме того, с целью снижения эксплуатационных расходов в современных судовых СОД используются высоковязкие топлива с максимально допустимым содержанием серы: моторное средневязкое HFO180 (Heavy Fuel Oil) – с вязкостью 180 мм<sup>2</sup>/с и содержанием серы  $S = 1...1,5\%$ ; моторное тяжелое

HFO 380 – с вязкостью 380 мм<sup>2</sup>/с и содержанием серы S = 2,5...3,0 %. При особых условиях работы используют аналогичные марки топлива HFO180-LS (Low Sulfur) и HFO380-LS с пониженным содержанием серы (S = 0,5...1,5 %), а также дизельное маловязкое топливо MDO (Marine Diesel Oil) с вязкостью 50 мм<sup>2</sup>/с, практически не содержащее сернистых соединений.

Структурный состав топлива также оказывает свое влияние на такой параметр, как его смазывающая способность, которая оценивается по величинам износа, критической нагрузке заедания металлов и сил трения (коэффициента трения). В ряде случаев более важной для практики характеристикой топлива является его противоизносные свойства, а не смазочная способность. Это объясняется тем, что для многих агрегатов (топливных, гидравлических), работающих в среде низкомолекулярных углеводородных жидкостей (масла или топлива), более важна защита их от повышенного износа, чем некоторое снижение мощности привода вследствие уменьшения сил трения [2].

Основным узлом дизеля, в котором может эффективно использоваться смазывающая способность топлива, является его топливная аппаратура, в частности плунжера топливных насосов высокого давления (ТНВД) и распылители форсунок. Для углеводородных жидкостей соблюдается следующее правило: улучшение противоизносных свойств приводит к улучшению смазывающей способности. Из этого правила есть исключения, прежде всего, при граничном трении (граничном смазывании), которое характерно именно для ТНВД. В этом случае определяющую роль играют особые «квазикристаллические» свойства топлива, которые зачастую не описываются расчетными методами, а определяются экспериментально [3].

В процессе полимолекулярной адсорбции топлива на поверхности прецизионной пары втулка – плунжер ТНВД сравнительно большая величина межмолекулярных сил обуславливает изменение характеристик граничного слоя. В этом случае асимметричное поле поверхностных сил, действующее со стороны металлических поверхностей пары втулка – плунжер ТНВД (которые можно рассматривать как твердую подложку для построения граничного смазочного слоя топлива), приводит к ориентационному упорядочению жидкокристаллического типа в приповерхностных (граничных) слоях [4]. Поэтому такие ориентационно упорядоченные приповерхностные слои топлива обладают особыми физико-химическими свойствами: теплоемкостью, анизотропией оптических характеристик, наличием

структурной компоненты расклинивающего давления. Именно последнее свойство способствует дополнительной упругости граничных слоев топлива и снижению энергетических потерь в прецизионных парах топливной аппаратуры высокого давления [5]. Увеличение C–S связей в топливе, вызванное общим ростом сернистых соединений, входящих в его состав, приводит к дезориентации граничных слоев и нивелированию эффекта расклинивающего давления.

Смазочное действие топлива в реальных условиях работы ТНВД проявляет себя в сложной совокупности, определяемой условиями трения, поэтому тяжелые условия работы топливной аппаратуры выдвигают повышенные требования к триботехническим характеристикам как самих прецизионных пар, так и топлив, используемых в СОД.

Учитывая изложенное, целью работы являлось определение влияния структурного состава топлива (в частности содержания сернистых соединений) на эксплуатационные и экономические параметры работы судового дизеля, а также на техническое состояние его топливной аппаратуры высокого давления.

Эксперименты выполнялись на трех однотипных судовых СОД S6A2 фирмы «Mitsubishi», имеющих автономную топливную систему. Это позволяло проводить параллельные исследования для различных сортов топлива. Во время эксперимента дизеля имели одинаковое техническое состояние и эксплуатировались при одинаковых нагрузках.

В качестве эксплуатационных характеристик определялись температура газов перед газотурбонагнетателем (ГТН)  $t_g$  и максимальное давление сгорания  $p_z$ , которые измерялись с помощью штатных средств диагностики. Эти параметры относятся к основным, по которым происходит регулирование рабочего процесса дизеля и определение рассогласования нагрузки по цилиндрам. За экономическую характеристику принимался удельный эффективный расход топлива.

Исследования проводились для разных сортов судового топлива: маловязкого MDO, средневязкого HFO180 и HFO180-LS, тяжелого HFO 380 и HFO380-LS.

Результаты исследований приведены в табл. 1 и на рис. 1, 2.

Анализируя приведенные данные можно сделать следующие выводы. При использовании топлив с повышенным содержанием серы в его структурном составе возрастает температура газов перед ГТН, а вместе с ней и тепловые нагрузки на весь дизель.

Таблица 1. Влияние топлив различного структурного состава на эксплуатационные характеристики работы судового дизеля

Марка топлива	Содержание серы в топливе, S, % по массе	Средняя температура газов перед ГТН, $t_{ср}$ , °С	Максимальное отклонение температуры газов перед ГТН от среднего значения, °С	Максимальное давление сгорания, $P_z$ , МПа	Отклонение максимального давления сгорания от среднего значения, %	Удельный эффективный расход топлива, $b_{эф}$ , г/(кВт·час)	Площадь пятен видимого износа поверхности плунжера ТНВД, $S_{пн}$ , мм <sup>2</sup>
MDO	0,1	348	8	13,1	2,28	186	64
HFO180-LS	0,5	353	12	13,25	2,35	192	87
HFO180	1,1	355	14	13,25	2,46	194	128
HFO380-LS	1,6	361	16	13,3	2,62	197	265
HFO380	2,8	363	18	13,4	2,66	199	316

Возрастание степени рассогласования величины максимального давления сгорания по цилиндрам дизеля свидетельствует как о повышении триботехнических потерь в элементах топливной аппаратуры дизеля, так и худшем распыливании топлива.

Кроме того, при проведении экспериментов оценивалось техническое состояние топливной аппаратуры дизеля и, в частности, состояние поверхности плунжера ТНВД. Основным видом дефектов данного узла является его износ. Высокого давления более подвержены коррозионному износу, чем механическому или абразивному.

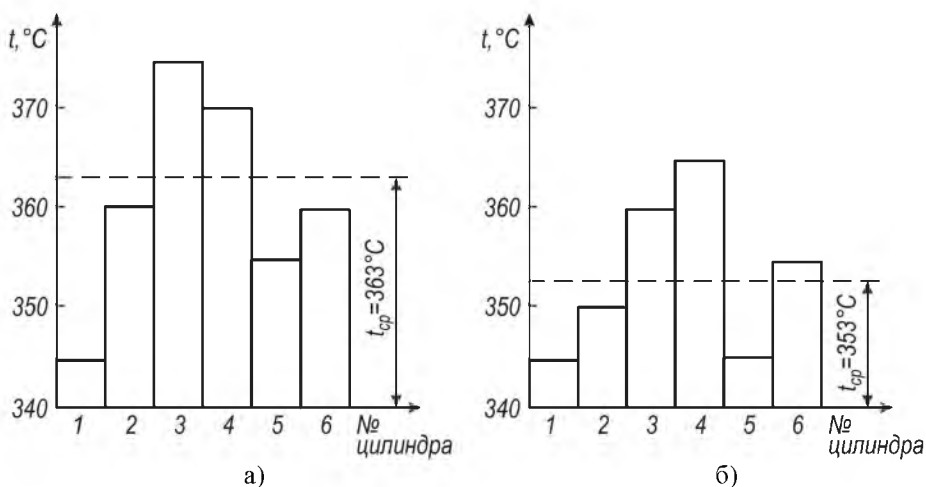


Рис.1. Рассогласование температуры газов перед ГТН по цилиндрам судового дизеля S6A2 при работе на различных топливах: а – высоковязкое HFO380, содержание серы  $S = 2,8\%$ ; б – средневязкое HFO180-LS, содержание серы  $S = 0,5\%$

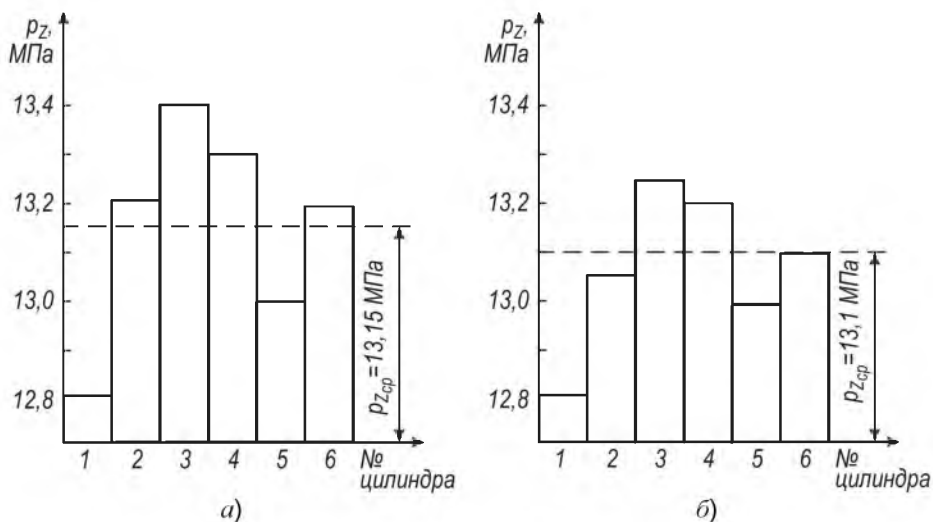


Рисунок 2. Рассогласование максимального давления сгорания по цилиндрам судового дизеля S6A2 при работе на различных топливах: а – высоковязкое HFO380, содержание серы  $S = 2,8\%$ ; б – средневязкое HFO180-LS, содержание серы  $S = 0,5\%$

При этом, учитывая степень фильтрации топлива перед ТНВД, детали топливной аппаратуры Так, наличие воды в топливе вызывает коррозионное разрушение поверхностей деталей прецизионных пар, причем оно значительно интенсифицируется при возрастании количества сернистых соединений в топливе. Частным видом коррозионного износа является окислительный, представляющий собой процесс образования на поверхности деталей пленки окислов вследствие адсорбции кислорода, растворенного в топливе. В процессе трения окисные пленки разрушаются и создают продукты износа, состоящие из окислов металла. Этот вид износа наблюдается обычно в условиях граничного трения (что характерно для ТНВД), когда происходит местный контакт поверхностей, сопровождающийся пластической деформацией и насыщением поверхностных слоев металла кислородом, растворенным в топливе. По мере возрастания толщины окисных пленок последние становятся хрупкими, и от внутренних напряжений, а также под действием гидравлических ударов струй топлива, происходит их разрушение, при этом обнажаются нижележащие участки поверхности металла и процесс разрушения повторяется.

Оценка износа поверхности плунжера ТНВД выполнялась путем определения площади пятен видимого износа  $S_{lh}$ . Для этого в интервале работы дизелей, позволяющим их кратковременный вывод из эксплуатации и равном 220, 410, 640, 830 и 1060 часов, проводился демонтаж плунжеров из двух крайних ТВНД (для 1-го и 6-го цилиндра). После этого в судовой лаборатории с помощью микроскопических исследований выполнялось определение величины  $S_{lh}$ . Динамика износа прецизионной пары плунжер–втулка ТНВД показана на рис.3, а максимальные значения  $S_{lh}$  после 1060 часов работы приведены в табл. 1.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что стремление обеспечить эксплуатацию судовых СОД на относительно дешевых сортах топлива, характеризующихся повышенными вязкостью и содержанием серы, приводит к ухудшению эксплуатационных параметров работы дизеля и технического состояния его элементов, в частности плунжеров ТНВД.

Таким образом, одной из задач современной эксплуатации судовых технических средств является нахождение оптимальных затрат на топливо и его подготовку при минимальных эксплуатационных

расходах на поддержание требуемого технического состояния и параметров работы судовых дизелей

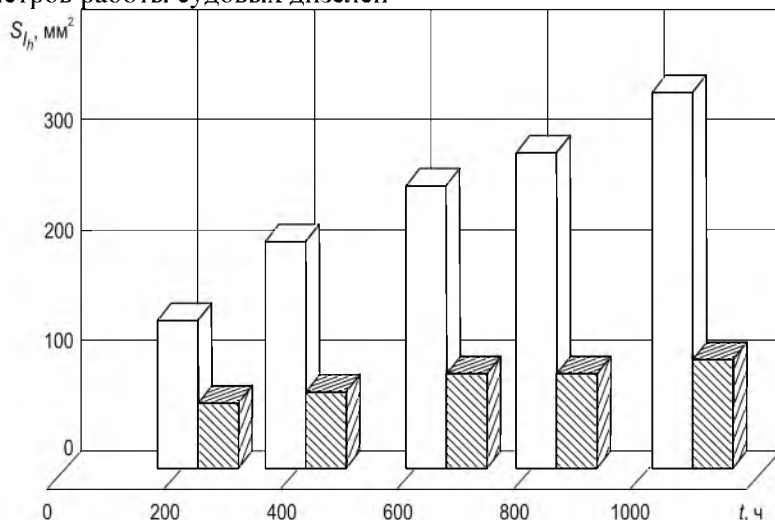


Рис. 3. Динамика изменения износа прецизионной пары плунжер–втулка ТНВД судовых СОД S6A2 при их работе на топливах с различным содержанием серы: чистые – топливо HFO380, содержание серы  $S = 2,8 \%$ ; штрихованные – топливо HFO180-LS, содержание серы  $S = 0,5 \%$

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматиз, 1963. – 472 с.
2. Конкс Г.А., Лашко В.А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с.
3. Заблоцкий Ю.В., Солодовников В.Г. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн.журнал. – 2013. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 46-56.
4. Мацкевич Д.В., Заблоцкий Ю.В. Определение смазочной способности дизельных топлив // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2011. – № 28. – Одесса: ОНМА. – С. 145–153.
5. Сагин С.В. Влияние жидкокристаллических свойств граничных смазочных слоев на реологические характеристики моторных масел // Проблемы техники: наук.-виробн.журнал. – 2013. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 64-71.