

УДК 621.436

Солодовников В.Г.
ОНМА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В СУДОВЫХ ДИЗЕЛЯХ ТОПЛИВ РАЗЛИЧНОГО ФРАКЦИОННОГО И СТРУКТУРНОГО СОСТАВА

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) морских судов являются крупнейшими потребителями жидкого топлива. Мощность главных и вспомогательных двигателей судовых энергетических установок (СЭУ) лежит в диапазоне от нескольких сотен до десятков тысяч киловатт. При среднем удельном эффективном расходе топлива 180...185 г/(кВт·час) суточный расход топлива главным двигателем (ГД) может составлять 200...250 тонн/сутки, а вспомогательными двигателями (ВД), количество которых на современных судах до 4-х, а количество параллельно работающих до 3-х, 10...12 тонн/сутки.

Для работы ДВС СЭУ используются топлива, которые традиционно делятся на тяжелые и легкие (дизельные). Эта классификация базируется на удельном весе, а точнее плотности топлива, которая для дизельных топлив при 20°C лежит в пределах 840...860 кг/м³, а для тяжелых до 980 кг/м³.

Дизельная энергетическая установка современных СЭУ комплектуется мало- и среднеоборотными дизелями (МОД и СОД). МОД, работающие по двухтактному циклу, используются в качестве ГД, передающих мощность на винт. Эту же функцию могут выполнять среднеоборотные четырехтактные дизели, однако наибольшее применение они получили в качестве ВД для привода судовых электрогенераторов [1].

Традиционно эксплуатация судовых МОД на установившихся режимах работы производится на тяжелых сортах топлива. Температура воздушного заряда в цилиндре дизеля в момент впрыскивания топлива, а также длительный период времени, приходящийся на его воспламенение, позволяет надежно использовать в этих типах дизелей топливо ухудшенного структурного и фракционного состава. Время эксплуатации МОД на легком топливе, а также на смеси легкого и тяжелого топлива определяется их работой на пусковых режимах и зависит от назначения судна. Естественно, что в случае работы в прибрежных районах и частых портах захода, когда эксплуатация ГД происходит на режимах пуска и реверса, время работы ди-

зеля на легком топливе повышается, как повышается и его расход. При длительных переходах эксплуатация ГД происходит только на тяжелых сортах топлива, причем время такой работы может достигать несколько десятков суток, что существенно снижает общие расходы легкого топлива.

Эксплуатационные режимы работы судовых СОД обеспечиваются как тяжелыми, так и легкими сортами топлива. Использование маловязкого топлива обусловлено необходимостью обеспечения его надежного самовоспламенения в течении более короткого (по сравнению с МОД) периода впрыскивания, длительность которого оценивается по выражению

$$\tau = \frac{\phi_d}{6n}, \text{ сек,}$$

где n – частота вращения коленчатого вала дизеля, об/мин;

$\phi_d = 15 \dots 35$ °пкв – действительная продолжительность подачи топлива в цилиндр.

Частота вращения коленчатого вала судовых МОД составляет 80...100 об/мин, а минимальное значение этого же параметра для СОД – 450...500 об/мин. Это приводит к тому, что даже при повышенной для СОД по сравнению с МОД продолжительностью подачи топлива в цилиндр время впрыскивания топлива и, соответственно, время его окисления, воспламенения и сгорания сокращается в 3..4 раза. Еще одной причиной использования в СОД легких сортов топлива является их частая работа на режимах пуска и частичного нагружения. При этом часть тепловой энергии, подведенной в процессе сжатия, теряется из-за плохо прогретых поверхностей деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ), что существенно снижает температуру в цилиндре в момент впрыскивания топлива и вынуждает использовать топлива с меньшей температурой самовоспламенения.

Фракционный состав топлива определяется количеством тех или иных нефтяных фракций, выкипающих при определенных температурных пределах. Фракционный состав топлив является одним из важнейших показателей его качества, который дает возможность оценивать испаряемость его паров и выражает зависимость между температурой и количеством перегоняющегося при этой температуре топлива. Фракционный состав (от которого зависит воспламеняемость топлива на пусковых режимах, а особенно в условиях экстренного пуска) важен при использовании топлива в судовых СОД, в которых сгорание происходит за меньший промежуток времени.

Топлива для судовых дизелей представляют собой сложные соединения горючих элементов, молекулярное строение которых еще недостаточно изучено, и включают в себя минеральные примеси и влагу. Элементарный химический анализ этих топлив не раскрывает химической природы входящих в них соединений и поэтому не может дать достаточно полного представления об их свойствах, но позволяет рассчитать тепловой и материальный баланс горения топлива. Элементарный химический состав топлива выражается зависимостью

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100\%$$

и состоит из горючих веществ: углерода C , водорода H , серы S , а также кислорода O и азота N , находящихся в сложных высокомолекулярных соединениях. Кроме того, топливо содержит негорючие минеральные примеси, превращающиеся при сжигании топлива в золу A и влагу W .

Основной горючей составляющей топлива является углерод, горение которого обуславливает выделение основного количества тепла. Содержание углерода в топливе составляет 85...88 %.

Вторым по значению элементом горючей массы топлива является водород, его содержание в горючей массе жидких топлив колеблется от 10 до 11%.

Кислород и азот в топливе являются органическим балластом, так как их наличие уменьшает содержание горючих элементов в топливе. Кроме того, кислород, находясь в соединении с водородом или углеродом топлива, переводит некоторую часть горючих компонентов в окислившееся состояние и уменьшает теплоту сгорания топлива. Азот при сжигании топлива в атмосфере воздуха не окисляется и переходит в продукты сгорания в свободном виде.

Сера в топливе находится в составе неорганических соединений. Содержание серы в топливе может достигать 3,5 %. Сернистые соединения, входящие в состав топлива, принято подразделять на активные и неактивные. Активные сернистые соединения (свободная сера, сероводород, меркаптаны) при контакте с металлом вызывают коррозию. Неактивные сернистые соединения (сульфиды, дисульфиды и др.) при обычных условиях не вызывают коррозии металлов. Однако, действие как активных, так и неактивных сернистых соединений в условиях протекания рабочего процесса в камере сгорания ДВС изменяется. Обе категории примесей переходят в разряд актив-

ных компонентов. Это происходит в следствии того, что при сгорании серы образуется сернистый газ SO_2 и серный ангидрид SO_3 , которые, вступая в реакцию с сконденсировавшейся водой. Образуют сернистую H_2SO_3 и серную H_2SO_4 кислоты. Эти кислоты вызывают сильную коррозию деталей цилиндропоршневой группы дизеля. Помимо этого, вследствие низкой теплоты сгорания присутствие серы уменьшает теплоту сгорания топлива. Поэтому сера является вредной и нежелательной примесью топлива. Кроме того, использование сернистых топлив напрямую связано с выполнением экологических требований, предъявляемым к судовым ДВС. Так, Приложением IV международной конвенции МАРПОЛ определены специальные районы, в которых возможно использование лишь топлива, содержащим не более 0,1 % серы. Эксплуатация судовых ДВС (как главных, так и вспомогательных) в таких районах возможна только на дистиллатных топливах, например DMX, DMA, DMZ (Marine Gas Oil – MGO) или DMВ (Marine Diesel Oil – MDO) [2].

Кроме серы в топливах наиболее распространены углеводородные примеси, вода и механические примеси. Углеводородные примеси – это в основном гетероорганические соединения, входящие в состав исходного сырья. Это более всего характерно для дизельного топлива, вследствие их высокой малярной массы и высоких температур кипения. Прежде всего это сернистые соединения, углеводородные кислоты и смолисто-асфальтовые вещества. Вода попадает в топливо при транспортировке, хранении, и перекачивании топлива и ускоряет коррозию металлических деталей двигателя. Механические примеси ухудшают прокачиваемость топлива по системе топливоподдачи, служат основой для образования смолистых отложений, увеличивают механический износ и коррозию металла. Особенно большой вред механические примеси приносят системам топливоподдачи дизелей, вызывая повышенный износ прецизионных деталей. Основным источником механических примесей является атмосферная пыль.

Структурный состав топлива определяет одну из основных его характеристик – низшую теплоту сгорания $Q_{\text{н}}$, численное значение которой может быть определено по формуле Д.И. Менделеева

$$Q_{\text{н}} = 339,15C^{\text{P}} + 1256H^{\text{P}} - 108,86(O^{\text{P}} - S^{\text{P}}) - 25,12(9H^{\text{P}} + W^{\text{P}}).$$

От низшей теплоты сгорания топлива $Q_{\text{н}}$ зависит его удельный эффективный расход b_e .

$$b_e = \frac{3600}{\eta_e \cdot Q_H},$$

где η_e – эффективный КПД дизеля.

При фиксированном значении эффективного КПД $\eta_e = 0,45$ изменение структурного состава топлива приводит к следующим изменениям низшей теплоты сгорания и удельного эффективного расхода топлива (табл. 1).

Таблица 1. Влияние структурного состава топлива на его низшую теплоту сгорания и удельный эффективный расход

| Изменение структурного состава топлива | | | | | Q_H , кДж/кг | b_e , кг/(кВт·ч) |
|--|-------|-------|-------|-------|----------------|--------------------|
| C^p | H^p | S^p | O^p | W^p | | |
| 87,0 | 11,3 | 1,0 | 0,4 | 0,3 | 41203 | 0,194 |
| 87,5 | 11,1 | 1,0 | 0,4 | 0,3 | 41870 | 0,191 |
| 87,2 | 12,6 | 0,1 | 0,05 | 0,05 | 42556 | 0,188 |

Стоимость топлива колеблется в зависимости от указанных характеристик. Для легкого топлива, без включений серы она составляет 850...880 \$USA/тонну, а для тяжелых, с содержанием серы до 1,5 % – 720 \$USA/тонну. Учитывая обозначенные выше расходы топлива на обеспечение эксплуатационной мощности дизелей, затраты на топливо для мощных СЭУ достигают 200...250 тыс.\$USA/сутки, а для СЭУ средней мощности 18...20 тыс.\$USA/сутки.

Одной из целей данной статьи было определение влияния содержания серы в топливе на технические характеристики ЦПГ и газоразводного тракта дизеля. Исследования выполнялись на судовом СОД 6Г74 фирмы «Русский дизель», имеющем следующие основные характеристики: номинальная эффективная мощность $N_e = 1150$ кВт, частота вращения вала $n = 500$ об/мин, удельный эффективный расход топлива $b_e = 0,196$ кг/(кВт·ч). В состав судовой энергетической установки входили два подобных дизеля. Двигатели имели разделенную друг относительно друга систему топливоподачи, что допускало эксплуатацию каждого дизеля на «своем» сорте топлива. Учитывая эту возможность, один из дизелей эксплуатировался на топливе, содержащем 1,3 % серы, а второй – 0,8 % серы. Условия эксплуатации позволяли перед началом эксперимента произвести полную замену втулок, поршней, поршневых колец, а также основных элементов топливной аппаратуры (плунжеров топливных насосов высокого

давления и форсунок) на обоих дизелях. Время работы дизелей во время эксперимента, а также среднестатистические нагрузки на дизели не превышали 4 % [3].

По истечении определенного времени работы, определяемого как показателями среднестатистической наработки на износ, так и возможностью временного вывода дизелей из эксплуатации, производилось определение износа цилиндровой втулки и верхнего поршневого кольца дизеля.

Определение износа цилиндрических втулок производилось в районе верхнего поршневого кольца, как места, наиболее подвергающегося сернистому износу и сернистой коррозии. Для повышения точности и достоверности измерений, определение износа цилиндрических втулок производилось методом искусственных баз и методом обмера индикатором (с точностью 0,01 мм/м). Отклонение в определении износа данными методами не превышало 7 %, что корректность измерений.

Износ поршневых колец выполнялся с помощью взвешивания на электронных весах.

Измерения износа проводилось для двух крайних цилиндров, которые, как известно, более чем другие (центральные цилиндры) подвержены этому явлению. Полученные при этом значения усреднялись. Кроме того, исследование только двух цилиндров существенно сокращало время монтажных работ, которое ограничивалось условиями эксплуатации. По этим же причинам исследования выполнялись после 190, 420, 560, 780 и 1020 часов работы двигателей. Результаты измерения износа цилиндрических втулок и поршневых колец приведены в виде табл. 2 и обобщены на рис. 1.

Анализ приведенных данных позволяет однозначно утверждать о принципиальном снижении износа как цилиндрических втулок, так и поршневых колец при использовании топлива с меньшим содержанием серы в своем структурном составе. Также, для топлива с меньшим содержанием серы, необходимо отметить более быстрое время достижения значений постоянного износа, которое, как известно, носит экспоненциальный характер. Кроме того, использование топлива, дополнительно прошедшего ультразвуковую обработку способствует улучшению технического состояния деталей цилиндропоршневой группы двигателя и его газораспределительной системы.

Таблица 2. Результаты эксперимента по определению износа ЦПГ дизеля при работе на топливе с различным содержанием серы

| Время проведения эксперимента, ч | Содержание серы в топливе | | | |
|----------------------------------|--|---|--|---|
| | S = 1,3% | | S = 0,8 % | |
| | Износ цилиндровой втулки, $I_{\text{в}}$, мкм | Износ поршневого кольца, $I_{\text{п}}$, г | Износ цилиндровой втулки, $I_{\text{в}}$, мкм | Износ поршневого кольца, $I_{\text{п}}$, г |
| 190 | 2,25 | 1,68 | 0,72 | 0,23 |
| 420 | 3,17 | 1,81 | 1,04 | 0,42 |
| 560 | 4,38 | 1,92 | 1,21 | 0,49 |
| 780 | 4,62 | 2,08 | 1,54 | 0,51 |
| 1020 | 5,31 | 2,22 | 1,83 | 0,57 |

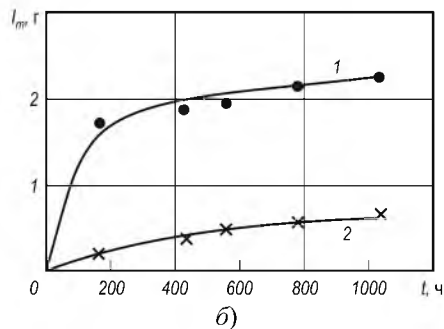
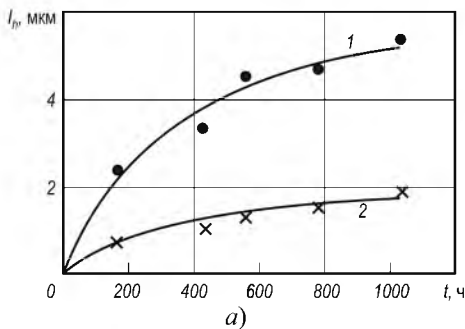


Рис.1. Износ цилиндровых втулок (а) и поршневых колец (б) судового ДВС 6Г74 при работе на топлив с различным содержанием серы:

1 – S = 1,3% по массе; 2 – S = 0,8 % по массе

Так при этом существенно уменьшается количество нагара на названных поверхностях нагрева, а также изменяется его структура (отложения нагара становятся более мягкими, что должно способствовать снижению абразивного износа, тепловой напряженности, аэродинамических и механических потерь).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заблоцкий В.Ю., Солодовников В.Г. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн.журнал.– 2013. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 46-56.
2. Калугин В.Н. Рекомендации по переводу работы судовых дизельных установок на низкосернистые морские сорта топлива // Матеріали наук.-техн. конфер. «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт», 21.03.2012-23.03.2012. – Одеса: ОНМА. – С. 94-101.
3. Сагин С.В., Солодовников В.Г. Применение ультразвуковой обработки топлива для снижения сернистого износа деталей двигателя / «Технические науки – от теории к практике» // Сб. ст. по материалам XXXV междунар. науч.-практ. конф. № 6 (31). Новосибирск: СибАК, 2014. – С. 42-49.