

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА ТОПЛИВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СЕРНИСТОЙ КОРРОЗИИ В СУДОВЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЯХ

Судовые среднеоборотные дизели (СОД) используются на всех без исключения морских и речных судах, обеспечивая требуемой мощностью как пропульсивный комплекс (в случае их работы на винт), так и судовую электростанцию (в случае, когда они используются в качестве приводов генераторов электрического тока).

При эксплуатации судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) не редко возникают различные дилеммы, к одной из которых относится использование в судовых СОД высоковязких топлив с высоким содержанием серы. Данные топлива обладают пониженной стоимостью, поэтому их применение в судовой энергетике, начавшееся с котельных установок и распространенное на крейцкопфные модели дизелей, в настоящее время все шире и происходит и для СОД. Более того, современные модели СОД и их топливная аппаратура проектируются непосредственно для использования топлив с вязкостью до 380 сСт и содержанием сернистых примесей до 3 %. При этом, на морском и речном флоте эксплуатируется достаточное количество дизелей ранних модификаций, спроектированных для работы исключительно на маловязком топливе без какого-либо содержания серы. Конвертация этих ДВС для работы на высоковязком сернистом топливе сводится к переоборудованию их топливной аппаратуры. Это приводит к улучшению распыливания и дальнейшего сгорания топлива, но никак не предотвращает такое явление, как сернистая коррозия деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ).

Решение задачи снижения сернистого износа деталей ДВС в настоящее время полностью выполнено для малооборотных дизелей, имеющих отдельную цилиндрическую систему смазывания. При этом задачей остается лишь найти оптимальное соотношение между содержанием серы в топливе и содержанием щелочных присадок в масле. Так, для топлив с содержанием серы до 2 % рекомендуется использование цилиндрических масел, включающих в свой состав 40 ... 50 мгКОН/г масла (где КОН – содержание щелочи в масле); для высоковязких топлив, содержащих до 3 % серы значение КОН может составлять 70 ... 80 мг/г.

Судовые СОД имеют общую циркуляционную систему смазыва-

ния, применение масел с повышенным содержанием щелочи в данном случае нецелесообразно как по экономическим причинам (в связи с их высокой стоимостью), так и ввиду их худших эксплуатационных параметров (в частности меньшей способности сопротивляться нормальным нагрузкам). Поэтому, для СОД единственным способом борьбы с последствием применения сернистого топлива является его дополнительная обработка перед подачей в цилиндр, способствующая впоследствии снижению сернистого износа. При этом необходимо учитывать, что решение проблемы по удалению сернистых примесей из топлива должно быть комплексным, т.к. любое физическое воздействие на топливо приводит к изменению практически всех его компонентов.

Исходя из того, что в горючей массе топлива находятся разнообразные сернистые соединения (элементарная сера, сероводород, меркаптаны, сульфиды, дисульфиды, тиофены, теофаны, сульфокислоты и др.), взаимодействующие с деталями ЦПГ, крышкой цилиндра, выпускными и продувочными клапанами при различном физико-химическом состоянии топлива, можно обозначить следующие основные пути защиты этих узлов дизеля:

- изготовление деталей дизеля из материалов, стойких к воздействию сернистой коррозии;

- изменения в конструкции дизелей, предназначенных для работы на сернистых топливах;

- применение нейтрализующих антисернистых присадок к топливу;
- исключение режимов работы дизеля, вызывающих наиболее интенсивную электрохимическую коррозию и повышенный износ (т.е. режимов с низкой температурой воды, охлаждающей стенки цилиндра и цилиндровую крышку);

- создание систем топливоподготовки, снижающих количество сернистых соединений, которые поступают в цилиндр дизеля;

- выбор режима работы системы топливоподготовки, обеспечивающего наиболее качественную обработку топлива.

Снижению сернистого износа деталей ЦПГ и выпускного тракта дизеля также способствует рациональная эксплуатация систем смазывания и охлаждения. Так, при работе ДВС необходимо поддерживать температуру охлаждающей воды и масла на верхних пределах, рекомендованных инструкциями (во избежание конденсации продуктов сгорания серы и образования крепких минеральных серосодержащих кислот, в первую очередь сернистой H_2SO_3 , и серной H_2SO_4). При эксплуатации дизелей на режиме частичных нагрузок рекомендуется повышать температуру воздуха на входе в цилиндр путем отключения охладителя наддувочного воздуха.

При сгорании топлива в цилиндре дизеля все содержащиеся в нем сернистые соединения образуют двуокись SO_2 и трехокись SO_3 серы. Одновременно в цилиндре образуется большое количество водяных паров и, таким образом, в продуктах сгорания появляется система из двух конденсирующихся компонентов $\text{H}_2\text{O} - \text{H}_2\text{SO}_4$, обуславливающая возможность интенсивной сернистой коррозии.

Условием выпадения конденсата на стенках цилиндра является превышение точки росы указанной двухфазной смеси над температурой стенок. Необходимо отметить, что точка росы смеси даже при очень малом содержании H_2SO_4 значительно превышает точку росы водяного пара. По мере дальнейшего снижения температуры поверхностей деталей до точки росы водяных паров из продуктов сгорания начинает выпадать раствор серной кислоты и вода, тем самым значительно снижается концентрация конденсата на стенках. Последнее обстоятельство приводит к резкому возрастанию агрессивности конденсата, поскольку известно, что серная кислота наиболее сильно реагирует с металлами при концентрации 3 ... 20 %. Таким образом, при температурах стенок цилиндра, превышающих точку росы продуктов сгорания, сернистая коррозия протекает слабо. В случае же, когда температура стенок оказывается ниже точки росы водяного пара, интенсивность коррозии резко возрастает.

Точка росы водяных паров может быть подсчитана по формуле, предложенной Б.Б. Генбомом [1]

$$t_s = 100 \left\{ \left[0,0016d\alpha L_o + \frac{H}{2} \left(\gamma_r + \chi_i \right) \right] \frac{P_\phi}{\mu_\phi (1 + \gamma_r) M_L} \right\}^{0,25}, \quad (1)$$

где d – массовое влагосодержание воздуха, г/кг; α – коэффициент избытка воздуха; L_o – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кмоль/кг; H – содержание водорода в топливе; γ_r – коэффициент остаточных газов; μ_o – коэффициент молекулярного изменения; χ_i – доля теплоты, выделяющейся в процессе сгорания; P_ϕ – текущее значение давления в цилиндре, кгс/см²; μ_ϕ – коэффициент молекулярного изменения, соответствующий углу поворота коленчатого вала; M_L – количество молей свежего заряда, кмоль.

Для определения влияния содержания сернистых примесей в топливе на точку росы целесообразно использовать эмпирическую зависимость, полученную В.С. Семеновым [2]:

$$t_p = t_s + 170 \left(\frac{\chi_i S_T}{\alpha} \right)^{1,29}, \quad (2)$$

где t_s – мгновенное значение точки росы водяных паров, определяемое по выражению (2.4); S_T – содержание серы в топливе, %.

Точка росы паров серной кислоты возрастает с увеличением ее концентрации и давления газов в цилиндре. В дизелях точка росы при положении поршня в верхней мертвой точке достигает величин 150 ... 180 °С и снижается примерно до 60 °С к концу хода расширения.

Очевидно, что наряду с сернистой коррозией нельзя отрицать наличия абразивного изнашивания деталей при работе на сернистом топливе. Однако, поддержание температуры охлаждающей воды и масла в рекомендуемых пределах позволяет уменьшить вредное слияние серы на дизель.

Для успешного применения вязких, высокосернистых топлив в судовых СОД необходимо решение комплекса организационно-технических задач от приема топлива на борт судна до его сжигания в цилиндре дизеля. Система топливоподготовки должна обеспечивать защиту дизеля при его работе сернистых топливах на всем диапазоне эксплуатационных режимов.

Одним из методов топливоподготовки, способствующим уменьшению вредного воздействия серы на детали ДВС, являются обработка топлива ультразвуком. Данный способ прежде всего способствует улучшению дисперсных качеств топлива, а явление кавитации, сопровождающее этот процесс, приводит к дополнительной активации его углеводородных составляющих и расщеплению C-S связей. Одним из вариантов применения ультразвуковой обработки топлива является дооборудование штатных систем топливоподготовки дополнительными модулями, осуществляющими этот процесс [3].

Таким модулем была доукомплектована система топливоподготовки дизелей 6VDS24 фирмы SCL, имеющих номинальную мощностью 350 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1000 мин⁻¹, входящих в количестве трех штук в состав судовой вспомогательной энергетической установки. Дизели имели каждый свою автономную систему топливоподачи, что давало возможность проводить исследования для отдельного дизеля с топливом, прошедшим разные этапы подготовки. Топливная система одного из двигателей не подвергалась перекомплектации и эксплуатировалась в "штатном" состоянии, при этом данный дизель принимался за "контрольный". Топливо к двум другим дизелям подавалось после дополнительной обработки с помощью ультразвуковых волн. Фрагмент участка по дооборудованию топливной системы дизелей показан на рис. 1.

Двигатель 6 являлся контрольным" и эксплуатировался в "штатном" режиме, при этом топливо, пройдя стандартную процедуру подготовки, подавалось к нему насосом 7 из цистерны 8. Двигатели 5 являлись "экспериментальным". Топливо к ним подавалось насосом 4 из

цистерны 2, в которой топливо подвергалось воздействию ультразвуковых волн с помощью генератора УЗДН-1 с магнитострикционными излучателями в диапазоне частот 22 ... 44 кГц. При этом эксплуатация одного из дизелей проводилась на минимально возможной температуре охлаждающей воды и смазочного масла с точки зрения обеспечения условий эксплуатации и предотвращения достижения температуры точки росы. Значения температуры охлаждающих сред, а также температуры точки росы рассчитывались по выражениям (1) и (2).

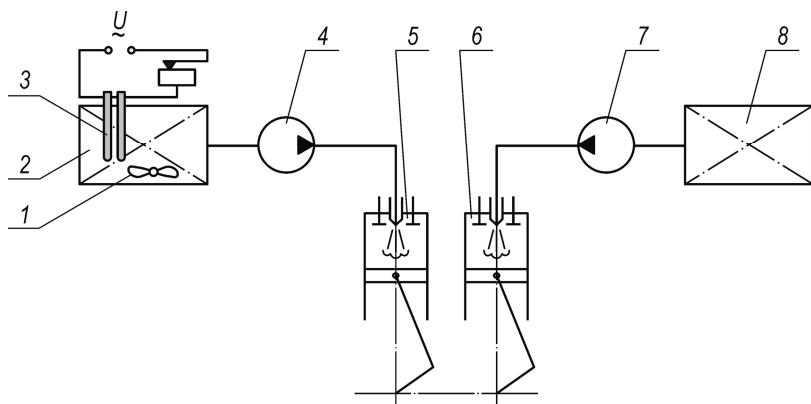


Рис. 1. Схема дооборудования системы подачи топлива к двигателю (фрагмент): 1 – смеситель лопаточного типа; 2, 8 – топливные цистерны; 3 – ультразвуковая установка; 4, 7 – топливные насосы; 5, 6 – двигатели

Ультразвуковая установка 3 эксплуатировалась в режиме $I = 0,4$ А с применением магнитострикционного излучателя в 22 кГц. Данные величины были определены в предыдущих лабораторных исследованиях и обеспечивали наилучшие дисперсные показатели топлива [3]. В топливной цистерне 2, в которой происходила ультразвуковая обработка топлива, дополнительно устанавливался лопаточный смеситель 1, что обеспечивало однородность топлива во всем объеме.

Для обеспечения идентичности эксперимента для всех дизелей проводилась их предварительная подготовка к испытаниям. Условия эксплуатации позволяли последовательно в течении 40 часов выполнить полную моточистку указанных дизелей. При этом на всех дизелях заменялась поршневая группа (поршни и поршневые кольца) и основные элементы топливной системы высокого давления (прецизионные пары топливного насоса высокого давления плунжер – втулка и игла – распылитель форсунки). Кроме того, перед началом экспери-

ментов для обоих двигателей производился контроль и регулирование топливной аппаратуры. При этом топливные насосы высокого давления регулировались на одинаковый угол опережения подачи топлива, а форсунки двигателей настраивались на одинаковые давления подъема иглы.

В течении всего времени проведения эксперимента осуществлялся контроль времени работы и эксплуатационной нагрузки на дизели. Для достижения равномерного распределения времени работы дизелей, двигатели последовательно переводились в режим stand-by. Разница во времени работы двигателей, а также в эксплуатационных нагрузках на двигатели не превышала 4 %, что, учитывая энергоемкость объектов, позволяло считать условия работы дизелей идентичными. Эксплуатация двигателей проводилась на одном и том же сорте топлива. При этом средства автоматического контроля поддерживали вязкость топлива неизменной в течении всего эксперимента. Также идентичными поддерживался сорт циркуляционного масла, обеспечивающего режимы смазывания, и его эксплуатационные характеристики. Данные мероприятия позволили считать, что выполнение эксперимента проходит в одинаковых условиях. Условия смазывания и охлаждения отличались лишь у одного "экспериментального" дизеля, который заведомо переводился на режим эксплуатации, способствующий повышенному коррозионному износу деталей ЦПГ.

Задачей исследования было определение износа цилиндрических втулок и верхнего поршневого кольца для "стандартного" топлива, и топлива, подвергнутого дополнительной обработке с помощью ультразвуковых волн.

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 170, 360, 580, 780 и 990 часов работы двигателей. Результаты измерения износа цилиндрических втулок и поршневых колец приведены на рис. 2 и 3.

Анализ приведенных результатов свидетельствует о том, ультразвуковая обработка топлива приводит к снижению сернистого износа деталей ЦПГ, при этом наибольшее снижение этого параметра наблюдается для поршневых колец, что особенно актуально, учитывая важность данного узла в обеспечении как качественных процессов сжатия, сгорания и расширения, и надежности работы сопряжения поршень – втулка цилиндра.

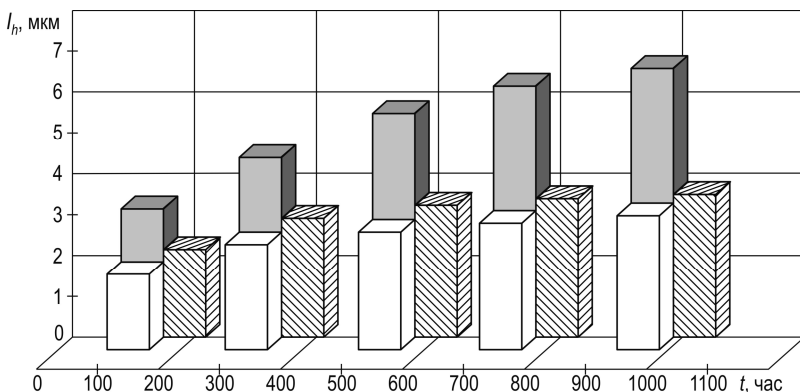


Рис. 2. Коррозионный износ цилиндрических втулок судового дизеля 6VDS18 при разных условиях эксплуатации: – топливо без дополнительной обработки (при эксплуатации системы охлаждения и смазывания дизеля в "штатном" режиме); – топливо, прошедшее дополнительную ультразвуковую обработку (при эксплуатации системы охлаждения и смазывания дизеля в "штатном" режиме); – топливо, прошедшее дополнительную ультразвуковую обработку (при эксплуатации системы охлаждения и смазывания дизеля на минимально допустимых температурных режимах)

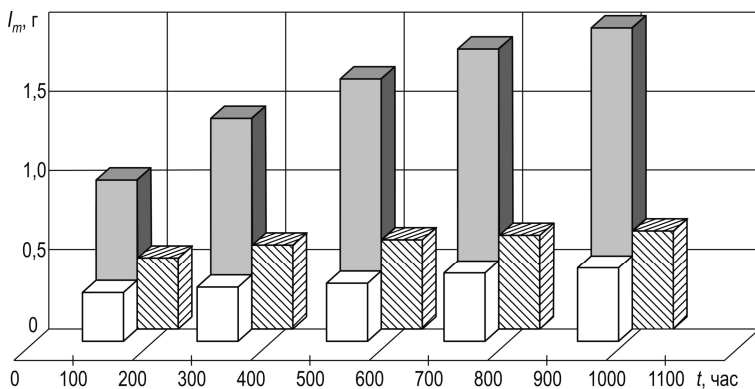


Рис. 3. Коррозионный износ цилиндрических втулок судового дизеля 6VDS18 при разных условиях эксплуатации: – топливо без дополнительной обработки (при эксплуатации системы охлаждения и смазывания дизеля в "штатном" режиме); – топливо, прошедшее дополнительную ультразвуковую обработку (при эксплуатации системы охлаждения и смазывания дизеля в "штатном" режиме); – топливо, прошедшее дополнительную ультразвуковую обработку (при эксплуатации системы охлаждения и смазывания дизеля на минимально допустимых температурных режимах)

Также необходимо отметить, что даже в условиях, способствующих повышенному коррозионному износу (работа системы охлаждения и смазывания дизеля на минимально допустимых температурных режимах), значения как линейного износа цилиндровых втулок, так и массового износа поршневых колец на 63 ... 65 % меньше аналогичных величин, полученных для дизеля, работающего на топливе без дополнительной подготовки.

Таким образом, полученные результаты подтверждают целесообразность применения устройств ультразвуковой обработки сернистых топлив для снижения сернистого износа деталей ЦПГ судового СОД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хандов З. А., Браславский М. И. Судовые среднеоборотные дизели. – Л.: Судостроение, 1975. – 316 с.
2. Семенов В. С., Трофимов П.С. Долговечность цилиндропоршневой группы судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1989. – 84 с.
3. Сагин С. В., Солодовников В.Г. Применение ультразвуковой обработки топлива для снижения сернистого износа деталей двигателя. // Сб. ст. по материалам XXXV междунар. науч.-практ. конф. "Технические науки – от теории к практике". – 2014. – № 6 (31). – Новосибирск: СибАК. – С. 42 – 49.