

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СМАЗЫВАНИЯ ЦИЛИНДРОВЫХ ВТУЛОК ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

В последние годы на морском флоте наибольшее распространение получили двухтактные дизели с непосредственной передачей вращения на винт. Это обусловлено рядом экономических и технических особенностей этих дизелей. Основной из них является наиболее оптимальное соотношение "цена – качество", оправдывающее себя в течение всего периода эксплуатации. Однако наряду с существенными преимуществами этих дизелей нельзя не отметить и ряд проблем возникающих в процессе эксплуатации. Зачастую при проектировании судовых дизелей оптимальные параметры работы принимаются из расчета работы дизеля на полной нагрузке. Однако реалии таковы, что во многих случаях эксплуатация судна осуществляется при заниженных нагрузках, иногда даже в диапазоне от 18 % до 25 % – Super Slow Steaming mode. Это позволяет приспособиться к состоянию рынка, обеспечив минимальные затраты на милю пути, жертвуя при этом скоростью, временем морского перехода и качеством процессов, протекающих в судовой энергетической установке (СЭУ). Решение проблем возникающих при эксплуатации СЭУ на долевых нагрузках является очень важным моментом, учитывая стоимость запчастей, затраты на техническое обслуживание и другие факторы.

В последнее время, "MAN Бурмейстер и Вайн" (MAN B&W) сконцентрировались на дальнейшем усилении топливной экономичности. Чтобы улучшить потребление мазута, в новых дизелях давление в камере сгорания было увеличено. Это увеличение давления, вместе с увеличением времени работы на низкой нагрузке, привело к увеличенной водной и кислотной конденсации на стенах цилиндров, которая в свою очередь приводит к низкотемпературной коррозии в камере сгорания. Правильный выбор дозировки масла подаваемого системой смазки в цилиндр главного двигателя позволяет не только обеспечить корректный режим смазки движущихся деталей, но и защитить от коррозии поверхности цилиндровых втулок. Система электронного управления подачей масла – Система Альфа Лубрикаторой смазки (САЛС) – широко используется совместно с двигателями фирмы MAN B&W. Производители рекомендуют настройку системы подачи цилиндрического масла получить на основе сервисных осмотров и измерений, позволяющих получить данные об износе деталей камеры сго-

рания (поршневые кольца, вкладыш, и свод). Проведение сервисных осмотров и последующий анализ его результатов зачастую субъективен и зависит от степени подготовленности инженера производящего эту процедуру. Проведение же измерение деталей цилиндропоршневой группы также (на многих судах) сопряжено с рядом трудностей (время, измерительный инструмент и т.п.).

На сегодняшний день существуют рекомендации по оптимизации параметров САЛС, однако зачастую их достаточно сложно реализовать в процессе эксплуатации на борту судна. Такое положение зачастую ставит в тупик оператора при выборе параметров работы системы смазки. Целью данной статьи является разработка обобщенного метода оптимизации САЛС судового малооборотного дизеля. Объект исследования служат процессы трения и износа в цилиндре дизеля.

САЛС обычно состоит из лубрикаторов, установленных на каждом цилиндре и снабженных исполнительным механизмом (сервомотором). Сервомотор приводит в движение плунжеры подачи масла. Моменты подачи и количество подаваемого масла определяются главным блоком управления, подающим управляющие сигналы на установленный на лубрикаторе соленоидный клапан. Впрыск осуществляется в момент, когда мимо штуцеров проходит пакет поршневых колец, что позволяет избежать забросов масла в подпоршневые полости и в камеру сгорания [1, 2].

Основные параметры, влияющие и определяющие работу САЛС это:

- частота вращения вала дизеля: для измерения которой используются два чувствительных элемента (основной и дополнительный), установленные на маховике дизеля;

- индекс рейки топливных насосов: трансмиттер снимает значение с рейки топливных насосов и преобразует их в электронный сигнал;

- давление цилиндрического масла: обеспечивается двумя насосами, работающими либо в паре, либо по отдельности (в зависимости от настроек системы). Данные считываются сенсором, установленным на линии нагнетания. Некоторые системы оборудованы дополнительными датчиками для оценки перепада на фильтрах, установленных на линии всасывания и нагнетания.

При настройке САЛС главной сложностью, с которой сталкивается оператор, является большое количество настроечных параметров и отсутствие описания алгоритма работы. Дается описание каждого из параметров по отдельности, но описания функциональных зависимостей между ними практически отсутствует. Наиболее значимыми при оптимизации является ряд параметров, которые задаются оператором с управляющего интерфейса:

MEP – среднее (главное) эффективное давление в процентах, равное моменту на валу дизеля в процентах и проценту индекса топливных насосов. В случае идеальной винтовой характеристики, устанавливаются следующие значения: MCR = 25 %, MEP = 40 %; MCR = 50 %, MEP = 63 %; MCR = 75 %, MEP = 82 %, MCR = 100, MEP = 100 %;

ACC-фактор – адаптивный коэффициент контроля над цилиндровой смазкой;

S , % – содержание серы в используемом топливе;

максимальное и минимальное значение подачи цилиндровой смазки;

значения ограничений по максимально и минимально допустимой подаче цилиндровой смазки;

ограничения для переключения системы на разные алгоритмы регулирования;

значения параметров сигнализации и защиты.

Удельный расход цилиндрового масла в САЛС может быть оценен по зависимости:

$$g_{уд} = A_{cc} \cdot S,$$

где A_{cc} – ACC-фактор – адаптивный коэффициент контроля над цилиндровой смазкой; S – процентное содержание серы в используемом топливе, %.

В комплексе вышеуказанные параметры позволяют довольно гибко осуществлять настройку САЛС. Однако выбор и обоснование их значений либо задан для номинальных режимов, либо не описано вовсе (требуется вызов сервисного инженера).

Наиболее полная оценка качества работы системы цилиндровой смазки может быть дана путем измерений износа цилиндровой втулки. По рекомендации фирмы MAN B&W нормально допустимой считается степень износа втулки ниже 0,1 мм / 1000 часов. Для измерения степени износа производят полную разборку одного (нескольких) цилиндра. Параллельно, при этом, производят очистку поршня от нагара, проверку уплотнении, замену прокладок и т.д. Для этой процедуры требуется вывод главного двигателя из эксплуатации примерно на 6 – 18 часов, что часто довольно сложно осуществить из-за множества факторов (погодные условия, требования портовых властей, недостаточное время стоянки и т.д.). Выходом из сложившейся ситуации может служить использование электронных измерителей цилиндровой втулки. Такие устройства позволяют в течение часа выполнить измерения втулки без разборки главного двигателя во всем диапазоне длины и во всех плоскостях (рис. 1). Однако, довольно высокая стоимость устройства (в настоящее время) не позволяет поставить прибор на все суда. При приобретении одного прибора на несколько

(серию) судов также возникают проблемы. На опыте использования данного устройства в компании Anglo-Eastern при передаче измерителя с судна на судно возникли проблемы: транспортировка с судна на судно. Кроме этого необходимо учитывать степень подготовленности экипажа при пользовании прибором.

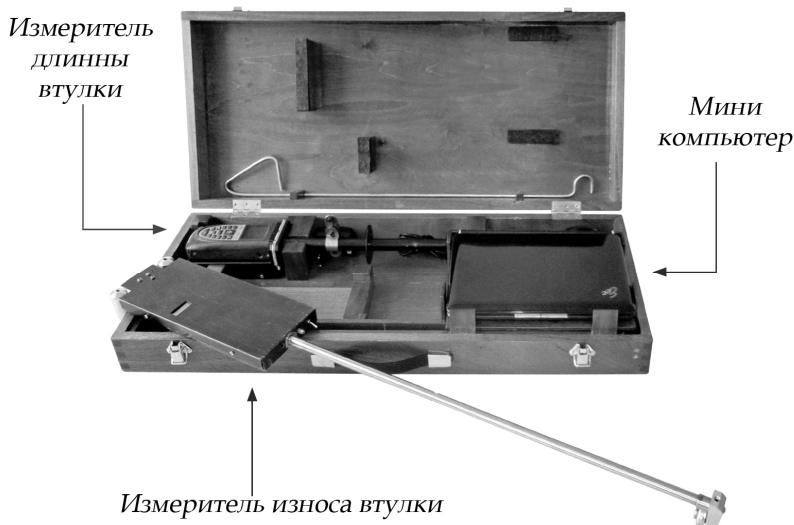


Рис. 1. Электронный измеритель износа цилиндровой втулки для двухтактного дизеля фирмы MAN B&W с диаметром поршня от 50 до 98 см

Для косвенной оценки процессов износа также может быть использован результат анализ масла из подпоршневого пространства. В качестве параметров для этой оценки можно принять:

- содержание железа в масле (Fe);
- остаточное щелочное число (BN).

Действительно данный анализ является серьезным инструментом для оценки износа, так как позволяет оптимизировать (минимизировать) износ, поддерживая значения BN между 10 – 25 мгКОН/г, а Fe ниже 200 – 300 мг/кг. Для наглядной оценки может быть использована графическая зависимость, приведенная на рис. 2. Эта схема оценки предполагает наличие трех зон. Первая зона – это область безопасной работы дизеля, т.е. если значение попадает в данную область, это свидетельствует о том, что система подачи смазки в цилиндр обеспечивает безопасную работу дизеля. При попадании параметра во вторую

зону необходимо рассмотреть возможность изменения настройки удельной подачи. Работа в третьей зоне не допускается, т.е. при значениях соответствующих третьей зоне необходимо принятие срочных мер по изменению настроек системы смазки. Данная зона характеризуется повышенным износом деталей.

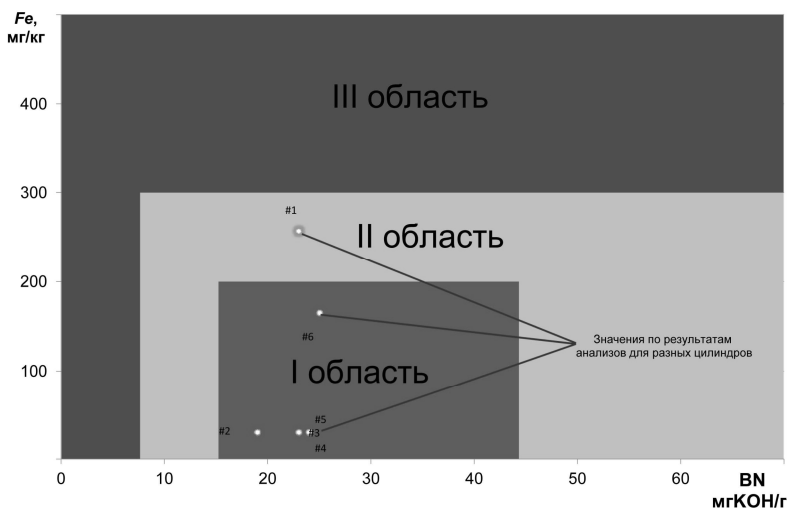


Рис. 2. Зависимость между содержанием железа и остаточным щелочным числом масла из подпоршневого пространства

Одним из методов оптимизации настройки САЛС является обобщенный метод настройки скорости подачи масла – Feed rate sweep test [3], предлагаемый фирмой MAN B&W. Данный тест проводится в течение 6 дней. За этот период значение удельной подачи цилиндрического масла изменяется от 1,4 г/кВт ч до 0,6 г/кВт ч (рис. 3). Каждый день производится забор проб масла из подпоршневого пространства при текущих настройках.

Однако существуют определенные сложности в реализации данного метода в процессе эксплуатации:

- постоянство нагрузки, которая при этом должна быть выше 25 % или 50 % (для модификаций двигателей МС-С начиная с Mark 8);
- относительное постоянство внешних факторов (волнение, течения, маневрирование);
- привязка к береговой лаборатории для анализа масла и др.

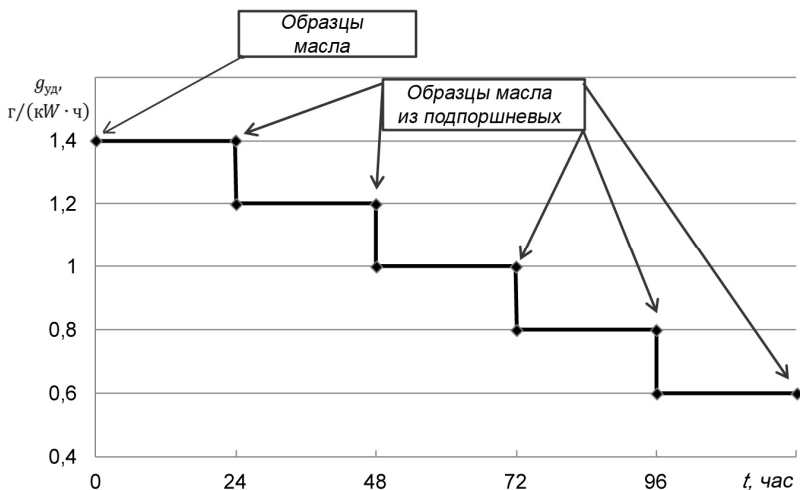


Рис. 3. Схема оптимизации скорости подачи масла – Feed rate sweep test

Метод показывает довольно точные результаты при соблюдении указанных выше условий. Однако добиться таких условий в период эксплуатации иногда бывает очень сложно. Цилиндровая подача масла может быть оптимизирована до определенного уровня, далее увеличивается вероятность возникновения низкотемпературной коррозии. Уровень содержания железа в масле из подпоршневого пространства будет отличаться в зависимости от марки используемого масла для цилиндрической смазки (производитель, марка масла), и поэтому рекомендуется отдельная оценка каждого двигателя и типа масла.

Исследования процессов износа и влияние на них параметров настройки САЛС было проведено на балкере "Mineral Honshu". Судно было спущено на воду в апреле 2012 года. Главный двигатель фирмой MAN B&W 6S70MC-C Mark 8. В течение года судно эксплуатировалось в диапазоне мощностей 25 – 30 %. Главный двигатель за период с апреля 2012 по июль 2013 года отработал 9000 часов. Весь этот период в качестве цилиндрического использовалось масло Talusia Universal со BN равным 57. Это масло является универсальным цилиндрическим маслом, и рекомендовано для использования как с низко сернистым, так и высокосернистым топливом [4]. Судну, работая в зоне, где требуется постоянный переход на разные виды топлива (SECA зона – Европа) необходимо было постоянно осуществлять смену сорта топлива и масла. Использование универсальных масел, позволило избежать смены масла, хотя при этом имел место некоторый перерасход цилин-

дрового масла. После обкатки двигателя в САЛС был установлен A_{cc} равный 0,3. Минимальный удельный расход – 0,8 г/(кВт ч). Температура охлаждающей воды (высокотемпературный контур) на выходе из цилиндров двигателя поддерживалась на уровне 90 °С (рекомендация завода изготовителя для Super Slow Steaming mode).

С мая по июль 2013 года были произведены измерения износа втулок первого, второго и пятого цилиндров. После их вскрытия были обнаружены признаки низкотемпературной коррозии в верхних частях всех цилиндрических втулок. При этом износ колец оказался незначительным. Износ втулок составил в среднем примерно 0,52 мм, что составило 0,057 мм за 1000 часов работы. Полученное значение величины износа не превысило максимально допустимого (0,1 мм за 1000 часов), но оно выше, чем рекомендованный фирмой MAN B&W для данного двигателя. По рекомендации производителя износ должен составлять не более 0,03 мм за 1000 часов.

В августе 2013 года был проведен Feed rate sweep test для оптимизации настройки САЛС. По результатам данного теста был установлен ACC фактор на уровне 0,34, для масел Talusia Universal (BN 57) и Shell Alexia S4 (BN 58) (рис. 4).

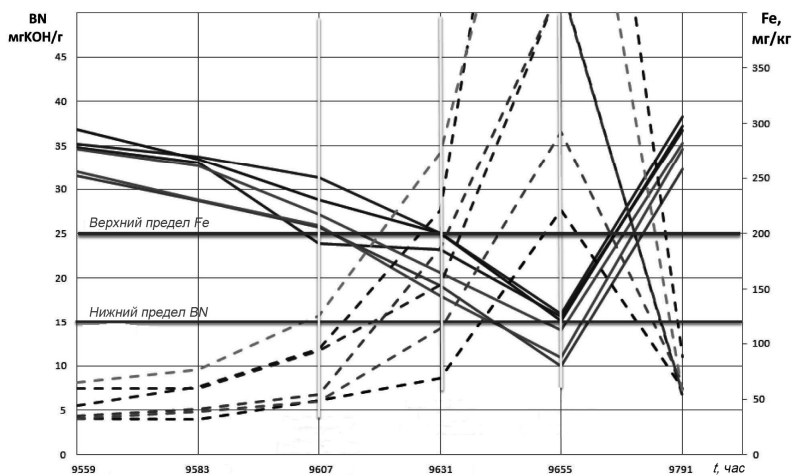


Рис. 4. Результаты Feed rate sweep теста на балкере "Mineral Honshu":
 ----- – Fe; ————— – BN

Однако опыт эксплуатации судна с заданными (оптимальными) настройками не дал должного результата. В феврале 2014 года после очередного измерения износа всех цилиндрических втулок (электронным

измерителем) было установлено, что процессы низкотемпературной коррозии продолжают прогрессировать. Износ втулок составил 0,096 мм на 1000 часов работы.

Анализ полученных данных износа позволил установить, что наиболее подвержен износу двигатель при работе в зоне переключения САЛС от регулирования по отклонению мощности к регулированию по отклонению частоты вращения. Производитель ввел ряд изменений в модификациях двигателе МС-С, начиная с Mark 8. Одним из этих изменений касаются как раз зоны переключения: от регулирования по отклонению мощности к регулированию по отклонению частоты вращения. В старых модификациях (Mark 7 и ранее) переключения осуществлялось при достижении 25 % мощности, начиная с Mark 8 с 50 %. Переключение к регулированию по отклонению частоты вращения приводит к чрезмерной смазке, особенно на очень низких нагрузках (ниже 25 %), что в свою очередь к нагарообразованию на поршневых кольцах. Кроме этого, увеличение количества неиспользованного цилиндрического масла и присадок может быть вредным для цилиндропоршневой группы, особенно при последующем увеличении нагрузки. Таким образом, было установлено, что даже повышенная подача масла не смогла обеспечить защиту цилиндрических втулок от повышенного износа.

Дальнейшие исследования и оптимизация САЛС проводились, основываясь на результатах анализа масла из подпоршневого пространства. Ежедневно, с февраля по август 2014 года, оценивались значения содержания железа и остаточного щелочного числа. Для измерений использовались судовые (бортовые) комплекты для анализа масла. Следует отметить, что для судовых комплектов важно получить действительный результат, показывающий полное содержание железа (согласно Американскому обществу по испытанию материалов). Щелочное число определялось в соответствии со стандартом 3771:2011 (Международной Организацией по Стандартизации).

При проведении исследования использовались два судовых комплекта разных производителей (рис. 5). Первый компании Shell, второй – GMT monitoring system. Фактически результаты выдаваемые вторым комплектом (GMT) являются более точными, однако он более сложен в использовании, требует довольно большого количества реактивов и большего количества времени для одного анализа. Первый, компании Shell, является электронным, совместим с персональным компьютером, но требует правильной калибровки.

Результаты ежедневных анализов позволили мгновенно реагировать на изменения контролируемых параметров. При этом в случае выхода значения за пределы первой области, сразу производилось

корректировка значения подачи цилиндрического масла. Для корректировки было проверено несколько алгоритмов.



Рис. 5. Лабораторные комплекты для тестирования масла из подпоршневого пространства: а) – фирма Shell; б) – фирма GMT monitoring system

Алгоритм 1. Пошаговое увеличение A_{cc} . Величина шага была принята равной 0,01 или 3 % (например, с 0,34 на 0,35). Было установлено, что при выходе значения за пределы первой области увеличение A_{cc} по данному алгоритму, в течение нескольких дней (2 – 4 дня) наблюдалось завышенное содержание железа в масле из подпоршневого пространства. Затем значения возвращались в нужную область. Таким образом, при использовании данного алгоритма в течение нескольких дней наблюдается повышенный износ деталей цилиндропоршневой группы.

Алгоритм 2. Пошаговое увеличение A_{cc} . Величина шага была принята равной 0,02 или 5 % (например, с 0,34 на 0,36). Было установлено, что при попадании значения в пределы второй области увеличение A_{cc} по данному алгоритму практически во всех случаях возвращало значения в первую область, т.е данный алгоритм корректировки при-

меним при незначительных изменениях оцениваемых параметров.

Алгоритм 3. Мгновенное увеличение A_{cc} на 10 % и затем пошаговое его уменьшение до тех пор, пока значения параметров не в первую область. Данный алгоритм показал наилучшие результаты. Следует отметить, что во время исследования имел место случай, когда при увеличении подачи на 10 % не удалось стабилизировать параметры в первой области. Для их стабилизации потребовалось еще раз увеличивать A_{cc} на 10 %. При дальнейшем уменьшении подачи, она вернулась на исходную величину, при этом значения Fe и BN вернулись в первую область.

В июле 2014 года измерения износов втулок показали положительный эффект использования данного метода. Общий износ втулок на 1000 часов работы составил 0,089 мм, т.е. в данном случае наблюдалось уменьшение износа втулок на 7 % за 1000 часов работы.

Проведенное исследование показало, что разработанный метод оптимизации настройки САЛС позволил обеспечить снижение удельного износа цилиндровых втулок (износ за 1000 часов) на 7 % в течение полугодия. Кроме этого, установлено, что для оптимизации настройки САЛС применим обобщенный метод настройки скорости подачи масла – Feed rate sweep test. Однако использование этих полученных оптимальных параметров без корректировки не рекомендуется для двигателей, работающих в Super Slow Steaming mode.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богач В.М., Задорожный А.А., Богач А.В. Исследование маслоподачи в цилиндры двигателей V&W // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2004. – Вып. 10. – Одесса: ОНМА. – С. 14 – 23.
2. Задорожный А.А. Повышение эффективности систем смазывания цилиндров судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2005. – Вып. 14. – Одесса: ОНМА. – С. 79 – 91.
3. MAN Diesel & Turbo [Electronic resource] // MAN Diesel & Turbo 2014. Режим доступа: <http://www.tribocare.com/pdf/MAN%20Diesel%20and%20Turbo%20SL2014-571.pdf>.
4. Гинзбург Л.Г. Исследование влияния качества цилиндрического масла и его дозировки на износы ЦПГ СДВС при их эксплуатации на высокосернистых топливах. – Дисс. канд. техн. наук. – Л., 1967. – 162 с.