

УДК 621.431

Семенов А.В.  
ОНМА

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РАСХОДА ЦИЛИНДРОВОГО МАСЛА СУДОВЫХ МАЛОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

Судовые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) являются самым распространенным типом тепловых двигателей и применяются как на морских, так и на речных судах. Одной из рабочих жидкостей, обеспечивающих работу ДВС, является моторное масло, которое подразделяется на два основных типа: цилиндрическое и циркуляционное. Первые используются для смазывания цилиндров судовых крейцкопфных малооборотных дизелей (МОД); вторые – для смазывания и охлаждения подшипниковых узлов.

При эксплуатации судовых ДВС не редко возникают различные дилеммы, к одной из которых относится использование в них высоковязких топлив с высоким содержанием серы. Данные топлива обладают пониженной стоимостью, поэтому их применение в судовой энергетике, начавшееся с котельных установок, распространилось и на ДВС. Применение подобных сортов топлива в настоящее время происходит как в крейцкопфных, так и в тронковых моделях дизелей.

Углубление переработки нефти сопровождается ухудшением качества всех видов топлив, что приводит к понижению надежности работы и ресурсных показателей судовых дизелей. При этом увеличиваются интенсивность старения моторного масла, загрязнение поверхностей дизеля углеродистыми отложениями и скорость их изнашивания.

В настоящее время ведущими в области разработки моторных масел являются международные нефтяные компании (Mobil oil, Shell, ESSO, Castrol, BP, Agip, Nippon Petroleum, Chevron Техасо и др.). Между ними ведется острая конкурентная борьба за рынки сбыта нефтепродуктов. Поэтому исследовательские центры компаний постоянно изыскивают пути улучшения качества масел за счет совершенствования их состава. Особое внимание уделяется вопросам экономики моторных масел в процессе их применения на судах, а также перспективам регенерации их эксплуатационных свойств. С этой целью дизелестроительными фирмами совместно и производителями смазочных материалов разрабатываются режимы смазывания, обес-

печивающие минимально возможную подачу масла к зонам контакта, а также проектируются специальные установки, позволяющие восстанавливать эксплуатационные свойства масел [1].

Основные функции масел сводятся к обеспечению надежной работы узлов трения, уменьшению трения и вызываемого им износа; предотвращению износа во всех иных его формах; удалению из зоны трения загрязняющих элементов; охлаждению путем отвода теплоты от трущихся поверхностей; обеспечению плотности в зоне кольцевого уплотнения поршней; предотвращению коррозии [2].

Проблемы, связанные с необходимостью разработки новых цилиндрических масел, возникли еще в начале 60-х годов прошлого века и были связаны с появлением на морских судах МОД с наддувом и переводом их работы на экономически выгодные топлива повышенной вязкости. Ответом на ужесточившиеся условия работы масел, а также на необходимость придания им соответствующих свойств, было создание рядом нефтяных компаний специальных цилиндрических масел в состав которых в обязательном порядке вводили соединения щелочи. Ее содержание определяется в мг гидроокиси калия КОН на 1 грамм масла, а величина может достигать 100 мгКОН/г.

Высокощелочные цилиндрические масла второго поколения (Mobilgard 570, Shell Alexia 50, Castrol S/02 и др.) с уровнем щелочных чисел 60...70 мгКОН/г длительное время успешно применялись в форсированных судовых МОД в условиях эксплуатации на топливах вязкостью 120...320 сСт при 50°C с содержанием серы до 3...4 %. Эксплуатация судовых дизелей на подобных сортах топлива и масла проводилась вплоть до начала нынешнего столетия, когда флот стал пополняться судами с длинноходовыми моделями двухтактных дизелей, высокофорсированными четырехтактными дизелями, а кроме того, ужесточились требования к экологическим параметрам работы судовой энергетической установки в целом и двигателей внутреннего сгорания в частности.

В настоящее время мировое судоходство, судовое дизелестроение, а также тенденции в изменении способов переработки нефти и качества топлив, поставляемых для флота, вступили в новый этап развития, задачи которого состоят в значительном повышении экономичности энергетических установок и обеспечении возможности использования в них сверхтяжелых топлив, полученных с привлечением вторичных продуктов переработки нефти. Следствием такого развития явилось создание длинноходовых и сверх длинноходовых

моделей МОД, для которых характерно отношение хода поршня к диаметру цилиндра до 4,0...4,3, а в самых последних моделях до 5,0. Длинноходовые малооборотные дизели отличаются от двигателей с традиционными соотношениями хода поршня к диаметру цилиндра сниженной частотой вращения на номинальной мощности, что обеспечивает более высокий индикаторный коэффициент полезного действия двигателя и пропульсивный коэффициент полезного действия всей установки. Высокая экономичность таких двигателей достигнута и благодаря повышению максимального давления сгорания и улучшению индикаторного процесса. Все эти изменения прямо касаются формирования масляной пленки на поверхности смазываемых деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ). Так, при равных рабочих объемах цилиндра длинноходового МОД и обычного в первом случае необходимо смазывать на 15...25 % большую площадь цилиндрической втулки. Увеличение максимальных давлений и температур в верхней части цилиндра приводит к повышению требований к маслу в отношении предотвращения образования отложений и износа.

Основные проблемы применения цилиндрических масел в длинноходовых МОД и пути их решения показаны в табл. 1.

Таблица 1. Использование масел для смазывания ЦПГ длинноходовых МОД

Проблема	Путь решения	Средства решения
Увеличенная площадь смазывания	Улучшение растекаемости масла	Базовое масло и присадки
Увеличение давления на поршневое кольцо	Увеличение прочности и толщины масляной пленки	Базовое масло и присадки
Большое время контакта с пламенем при сгорании	Высокая термическая стабильность	Базовое масло и присадки
Тенденция к коррозионному износу	Более высокая скорость нейтрализации кислоты	Присадки
Тенденция к росту углеродистых отложений	Высокий уровень моющих свойств (детергентности)	Присадки

Анализ современных тенденций развития МОД показывает, что для обеспечения необходимой долговечности и надежности современных двигателей к цилиндрическому маслу предъявляются особые требования, во многом более жесткие, чем те, которые выдвигались для МОД предшествующих моделей. Эти свойства должны обеспечивать равномерность распределения масла по втулке цилиндра. В

длинноходовых МОД в связи с уменьшением частоты вращения увеличено (по сравнению с обычными дизелями) время нахождения масляной пленки до ее обновления на поверхности втулки, в результате чего масло должно выдерживать большую термическую нагрузку, выполняя необходимые функции. Одной из важнейших задач является обеспечение толщины и прочности смазочной пленки в условиях низких скоростей поршня, например, при движении судов на экономичных ходах, что довольно широко распространено в современном судоходстве [3].

Судовые МОД и системы обработки топлива современных судов модифицированы на применение сверхтяжелых топлив с вязкостью до 750 сСт при 50 °С и плотностью до 1010 кг/м<sup>3</sup>. Особенности условий работы цилиндрического масла на поверхностях деталей ЦПГ при использовании высоковязких топлив определяются более длительным сгоранием топлива на линии расширения, высокой степенью термического воздействия на масляную пленку, попаданием на ее поверхность относительно большого количества сажи в результате неполноты сгорания, попаданием капелек несгоревшего топлива на пленку из-за увеличения дальности распыления топлива большой плотности. Такой процесс смешивания частиц, находящихся на поверхности цилиндра, оказывает отрицательное воздействие на смазывающие свойства масла, способствует снижению его термической и термоокислительной стабильности.

Использование тяжелых и сверхтяжелых топлив в крейцкопфных дизелях предопределяет ужесточение требований к ряду свойств цилиндрического масла [4, 5]. Прежде всего, это касается обеспечения нейтрализующей способности, высокой термо-окислительной стабильности и антинагарных свойств масла [6].

ЦПГ дизелей относится к объектам постоянного контроля технического состояния. В современных условиях эксплуатации судовых дизелей выполнение частых визуальных инспекций цилиндрических втулок не всегда представляется возможным. Прежде всего, это связано с периодом безостановочной работы главных двигателей морских судов (например, длительность океанских переходов может достигать 20...30 суток), а также с большими трудозатратами на их выполнение. Поэтому для диагностирования технического состояния цилиндрической группы применяются косвенные методы. Самым распространенным и доступным для условий морского судна является определение щелочного числа и количества металлических примесей

в масле, взятом из подпоршневых пространств дизеля. Для этой цели используются судовые лаборатории, такие как Cylinder Scrape-Down Oil Analysis, Unimarine Cylinder Scrape-Down Oil Analysis, Shell Analex Alert, Signum onboard test kit of ExxonMobil, Parker Kittiwake Cold Corrosion Test Kit, Digi TBN Test Kit и некоторые другие.

Современные методы диагностирования, анализируют уровень коррозии цилиндрических втулок судовых дизелей, на основе определения остаточного щелочного числа масла (base number – BN), взятого из подпоршневых пространств. При этом по величине BN возможно дать оценку состояния цилиндроворшневой группы. Состояние коррозии цилиндрических втулок, разделяется на три основные группы:

- 1)  $BN = 17...45$  – цилиндрические втулки эксплуатируются в допустимом режиме, их износ не превышает допустимого значения;
- 2)  $BN = 10...16$  – цилиндрические втулки подвергаются повышенному коррозионному воздействию, что может способствовать интенсификации процесса изнашивания;
- 3)  $BN < 10$  – в цилиндре дизеля происходит сернистая коррозия, способствующая увеличению износа ЦПГ.

При эксплуатации дизеля в условиях 1-го режима ( $BN = 17...45$ ) цилиндрическая масляная система не подвергается регулировке, и удельный расход цилиндрического масла считается оптимальным для данного режима работы.

Условия 2-го режима ( $BN = 10...16$ ) свидетельствуют о недостаточном количестве масла, поступающего на поверхность цилиндрической втулки и для восстановления требуемого значения BN необходимо регулирование подачи цилиндрического масла.

Работа дизеля на третьем режиме (с показателем  $BN < 10$ ) относится к аварийным условиям, свидетельствует о повышенном износе цилиндрической группы и считается недопустимой. При этом необходимо не только регулирование подачи цилиндрического масла, но и регулирование интенсивности охлаждения цилиндрических втулок, а также перевод дизеля на режим пониженной нагрузки.

Основными показателями количества подачи цилиндрического масла на цилиндрические втулки являются АСС фактор (adaptive cylinder oil control) и расход масла FR (feed rate). Величина АСС фактора принимается по экспериментальным данным, в зависимости от значений PQI (Particle Quantity Index) – количества металлических частиц и BN в анализах масла, взятого из подпоршневого пространства. Для судовых малооборотных дизелей  $АСС = 0,2...0,35$ .

Рекомендуемый расход масла рассчитывается по формуле, (г/(кВт·ч))

$$FR = ACC \times S,$$

где S (sulfur) – количество серы в топливе, %.

При этом, необходимо учитывать что рекомендуемый расход масла не должен быть ниже 0,6 г/(кВт·ч). На современных морских судах, оснащенных малооборотными дизелями, установлены системы автоматического управления (в частности система LUBECES), которые поддерживают минимальный расход цилиндрического масла 0,6 г/(кВт·ч) независимо от режима работы дизеля.

Для технического состояния цилиндрической группы дизеля по анализам масла, взятого из подпоршневого пространства, выполнялись исследования на судовом дизеле 12K98ME-C7 фирмы DOOSAN-MAN-B&W, установленном в качестве главного двигателя судне APL Southampton дедвейтом 131358 тонн. Основные характеристики дизеля:

номинальная мощность – 54120 кВт;

номинальная частота вращения – 97 об/мин;

количество цилиндров – 12;

диаметр цилиндра – 980 мм.

Во время проведения экспериментальных исследований дизель работал на одном и том же сорте топлива марки RМК 700 со следующими характеристиками

плотность при 15°C, кг/м<sup>3</sup> – 990;

вязкость, сСт, при 50°C – 700;

температура вспышки (min), °C – 60;

содержание серы, % – 2,5...2,7.

Смазывание цилиндров дизеля обеспечивалось маслом Mobilgard570 со следующими показателями:

плотность при 15°C, кг/м<sup>3</sup> – 820;

температура вспышки, °C – 256;

вязкость, сСт, при 40°C – 229;

вязкость, сСт, при 100°C – 21;

щелочное число (total base number – TBN), мгКОН/г – 70.

Задачей исследования было определение оптимального расхода цилиндрического масла с одновременной диагностикой технического состояния ЦПГ дизеля.

Исследования по определению оптимальной подачи цилиндрического масла выполнялись только на установившихся режимах работы дизеля. Постоянство нагрузки на дизель определялось неизменными частотой вращения коленчатого вала и цикловой подачей топлива.

Для каждого цилиндра дизеля устанавливалось свое значение подачи цилиндрического масла. Отклонение ее величины по цилиндрам не превышало 5% от среднего значения. Из подпоршневого пространства каждого цилиндра выполнялся отбор проб отработавшего масла с последующим определением в судовой технической лаборатории значений BN и PQI. Эксперименты были выполнены для десяти циклов с интервалом отбора проб 24 часа. Усредненные значения полученных результатов эксперимента показаны на рис. 1.

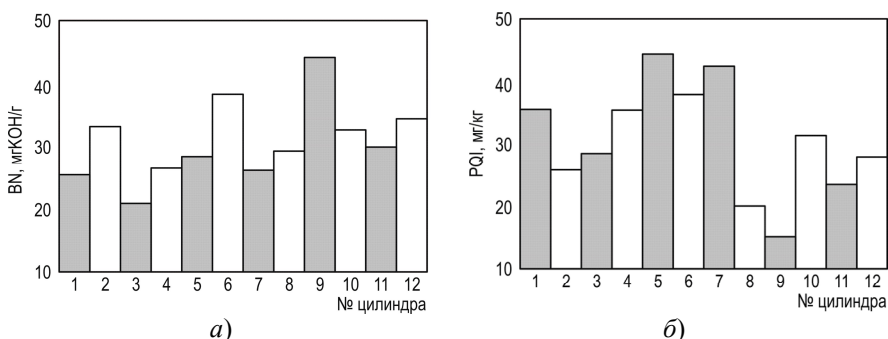


Рис. 1. Определение оптимального значения подачи цилиндрического масла по величине BN (а) и PQI (б) для судового дизеля 12K98ME-C7

Из зависимостей, представленных на рис.1 видно, что уровень подачи масла, установленный для 9-го цилиндра, обеспечивает наибольшее значение BN при минимальном количестве PQI. По результатам испытаний было определено оптимальное значение АСС-фактора и в дальнейшем (с учетом содержания серы в топливе) рассчитан рекомендуемый расход масла FR.

Во время эксперимента на судовом малооборотном дизеле 12K98ME-C7 фирмы DOOSAN-MAN-B&W контролировался и ряд других параметров, динамика изменения которых приведен в таблице 2. В таблице отображены исследования на примере 9-го цилиндра главного двигателя, который характеризовался оптимальными значениями BN и PQI. Аналогичные результаты были получены для всех

12-ти цилиндров дизеля, однако, для уменьшения объема статьи в качестве примера указан только 9-й.

Таблица 2. Определение оптимального расхода цилиндрического масла судового дизеля 12K98ME-C7 фирмы DOOSAN-MAN-B&W

Дата (дд/мм/гг)	Длительность эксплуатации главного двигателя	TBN цилиндрического масла (ExMob570), мгКОН/г	Содержание серы в топливе, %	Мощность главного двигателя, кВт	Частота вращения вала, об/мин	Расход цилиндрического масла, л/24ч	Удельный расход цилиндрического масла, г/(кВт·ч)	PQ-Index	BN отработанного масла, мгКОН/г	ACC фактор	Feed Rate (расчетное значение), г/(кВт·ч)	Min Feed Rate (минимально возможное значение), г/(кВт·ч)
12.11.14	9380	70	2,51	17048	66	414	0,77	32	21	0,27	0,554	0,6
22.11.14	9610	70	2,51	28140	78	403	0,72	37	18	0,30	0,792	0,792
04.12.14	9940	70	2,51	46175	92	428	0,75	10	22	0,28	0,745	0,745
18.12.14	10156	70	2,68	13460	61	484	1,22	52	35	0,26	0,522	0,6
22.12.14	10247	70	2,68	26030	76	418	0,78	45	35	0,26	0,765	0,765
30.12.14	10383	70	2,68	31513	81	426	0,81	35	44	0,27	0,813	0,813
11.01.15	10611	70	2,68	18645	68	476	1,12	65	26	0,23	0,482	0,6
21.01.15	10809	70	2,53	35150	63	391	0,76	17	47	0,22	0,462	0,6
08.02.15	11098	70	2,53	33906	83	376	0,58	7	19	0,27	0,667	0,667
19.02.15	11274	70	2,53	37717	86	388	0,63	7	28	0,27	0,587	0,6

Из результатов, представленных в табл. 2, отдельно отметим величины ACC-фактора, Feed Rate и Min Feed Rate.

Исследование показало, что оптимальный расход цилиндрического масла для дизеля, использующего топливо с высоким содержанием серы, достигается нахождением оптимальной величины ACC-фактора. Это значение определяется для каждого двигателя в отдельности и зависит от его технического состояния и особенностей системы цилиндрической смазки. Значение ACC-фактора является постоянным и расход цилиндрического масла Feed Rate при переходе на различные топлива зависит только от содержания в нем серы.

Min Feed Rate – расчетный минимальный расход масла на смазывание цилиндров двигателя. Его значение ограничивается мини-



мально допустимым расходом, установленным фирмой-производителем. В случае работы дизеля на сверхмалых нагрузках (в проведенном эксперименте 61, 63, 66, 68 об/мин) в цилиндр дизеля подается ограниченное количества цилиндрического масла в одном впрыске. На данных режимах расчетное значение FR составляет 0,462...0,554 г/(кВт·ч). В связи с этим происходит принудительная подача масла на каждом 12-ом ходу поршня до обеспечения величины 0,6 г/(кВт·ч). На данных режимах работы судовой экипаж имеет возможность изменения величины Feed Rate только в сторону увеличения значения подачи масла.

С целью дополнительного контроля результатов исследований, а также в связи с периодическими проверками состояния ЦПГ со стороны судовладельца, выполнялась сдача проб отработанного масла для анализа в независимую береговую исследовательскую лабораторию. Основными параметрами, по которым производилась диагностика состояния цилиндрических втулок, были содержание в отработавшем масле металлических примесей (Fe), ванадия (V), никеля (Ni), кремния (Si), определяемых в мг/кг, а также величины BN и PQI. При этом наработка как главного двигателя, так и цилиндрических втулок составляла 9610 и 10809 часов работы и соответствовала датам 22.11.14 и 21.01.15 (табл. 2). В результате были получены соразмерные судовым исследованиям значения, что подтвердило корректность и адекватность предложенной методики, а также правильность настройки системы подачи цилиндрического масла.

По результатам исследований в береговой лаборатории были также построены диаграммы, отражающие значения основных характеристик отработанного масла (рис. 2).

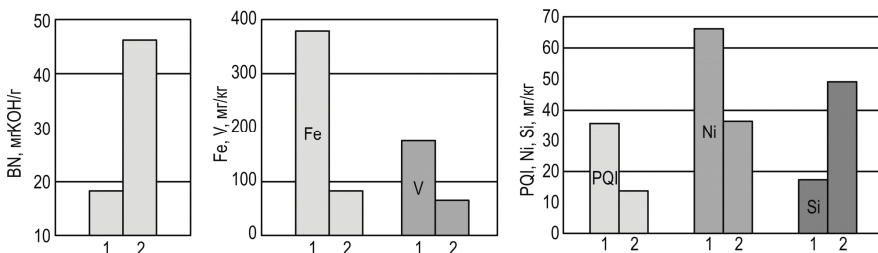


Рис. 2. Значения BN (base number), Fe (Iron), V (Vanadium), PQI (Particle Quantity Index), Ni (Nickel), Si (Silicon) в пробах масла, взятого из подпоршневого пространства судового дизеля 12K98ME-C7 фирмы DOOSAN-MAN-B&W: 1 – после 9610 часов работы; 2 – после 10809 часа работы

Полученные результаты береговой лаборатории, в контрольных датах, показали увеличение BN, уменьшение PQI и Fe в анализах подпоршневого масла, подтвердив правильность регулирования подачи масла в судовых условиях. Изменения в значениях Ni, Si, V характеризуют ухудшение качества используемого топлива.

Результаты исследований по оптимизации расхода цилиндрического масла позволили определить оптимальный АСС фактор для конкретного двигателя 12K98ME-C7 фирмы DOOSAN-MAN-B&W и принять его равным 0,27. Это позволило безопасно эксплуатировать ЦПГ дизеля при его работе на топливе с содержанием серы до 3% и определить оптимальный расход цилиндрического масла. Данные факторы обеспечили экономически эффективный режим работы дизеля при минимальном коррозионном износе цилиндрических втулок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мацкевич Д. В. Регенерация анизотропных свойств углеводородных жидкостей в процессе эксплуатации / Д. В. Мацкевич // Проблемы техники. – 2013. – № 1. – С. 63-71.

2. Сагин С. В. Особенности подготовки масляной системы судовых дизелей, работающих на винт регулируемого шага, при выходе судна из сухого дока / С. В. Сагин, Д. В. Мацкевич // Проблемы техники. – 2011. – № 3. – С. 50-56.

3. Патрахальцев Н. Н. Повышение экономичности режимов малых нагрузок судового дизеля, работающего на винт регулируемого шага / Н. Н. Патрахальцев, И. С. Мельник, И. А. Петруня. // Двигателестроение. – 2013. – № 1 (251). – С. 38-42.

4. Богач В. М. Особенности процесса истечения масла в цилиндры судовых дизелей MAN-B&W / В. М. Богач, А. А. Задорожный, И. Д. Колиев // Судовые энергетические установки. – Одесса, 2005. – Вып. 14. – С. 116-126.

5. Цветков Ю. Н. Соотношение потерь на трение, приходящихся на граничный и гидродинамический режим смазки, в двигателях внутреннего сгорания / Ю. Н. Цветков, Д. А. Крылов, А. А. Татулян // Двигателестроение. – 2010. – № 1 (239). – С. 13-20.

6. Рождественский Ю. В. Влияние вязкостно-температурных свойств моторных масел на гидромеханические характеристики трибосопряжения поршень-цилиндр / Ю. В. Рождественский, К. В. Гав-

---

рилов, И. В. Мухоротов // Двигателестроение. – 2010. – № 2 (240). – С. 23-26.