Судовые энергетические установки

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-5>
УДК 621.43.013:629.3

Г.П. Кича, Н.С. Молоков, А.В. Надежкин

КИЧА ГЕННАДИЙ ПЕТРОВИЧ – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой (автор, ответственный за переписку), SPIN: 2469-6099, ResearcherID: W-2855-2017, ORCID: 0000-0001-8298-9956, ScopusID: 7801430889, kicha@msun.ru

МОЛОКОВ НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ – аспирант, SPIN: 8121-6450, nikolaimolokov2014@mail.ru

НАДЕЖКИН АНДРЕЙ ВЕНИАМИНОВИЧ – д.т.н., профессор, SPIN: 7051-7899, ResearcherID: V-8426-2017, nadezkin@msun.ru

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
Владивосток, Россия

Выбор индекса производительности центробежного сепаратора для комбинированных маслоочистительных комплексов судовых тронковых дизелей

Аннотация: Показана перспективность комбинированной очистки моторного масла в судовых тронковых дизелях с использованием саморегенерирующихся фильтров и сепараторов. Этот метод очистки особенно эффективен для форсированных высокоавтоматизированных двигателей с низким угаром масла, работающих на высоковязких остаточных топливах. Обосновывается важность надежной защиты подшипников двигателя от абразивного изнашивания полнопоточным фильтрованием масла. Центробежный сепаратор, работающий по байпасной схеме, эффективно удаляет из системы смазки мелкодисперсную фазу нерастворимых загрязнений, что обеспечивает функционирование и повышает автономность саморегенерирующегося фильтра, а также замедляет старение смазочного масла. Доказывается необходимость подбора сепаратора по удельному индексу производительности, обеспечивающему ресурсосберегающее маслоиспользование в системе «дизель–топливо–масло–очистка». Новизна экспериментального моделирования эффективности этой системы состоит в оценке с помощью лабораторной моторной установки трибологических показателей отработавшего в судовом дизеле смазочного масла, отражающих взаимодействие звеньев рассматриваемой системы, и установлении их связи с изнашиванием двигателя. Эффективность системы идентифицирована по критерию изнашивания дизеля, что позволяет использовать ее расчетно-экспериментальную модель для определения параметров центробежного сепаратора – с тем, чтобы он удовлетворял требованиям рассматриваемых взаимодействующих звеньев. Модель трансформирована в выражение для расчета удельного, приходящегося на единицу мощности двигателя индекса производительности сепаратора, обеспечивающего минимальное изнашивание двигателя, бесшумную работу смазочного масла и автономный срок службы саморегенерирующегося фильтра не менее 3 тыс. ч. Полученные рекомендации по подбору сепаратора в системе смазки двигателя с полной реализацией достоинств автоматизированной тонкой очистки моторного масла комбинированием фильтрования и центрифугирования применимы для судовых дизелей средней и повышенной частоты вращения мощностью до 20 тыс. кВт.

Ключевые слова: ресурсосберегающее маслоиспользование, саморегенерирующийся фильтр, центробежный сепаратор, изнашивание дизеля, комбинированная очистка масла, смазочная система, индекс производительности сепаратора, оптимизация сепарирования масла

© Кича Г.П., Молоков Н.С., Надежкин А.В., 2020

Статья: поступила: 20.07.2020; рецензия: 17.08.2020; принята: 09.09.2020; финансирование: Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского.

Введение

Причина того, что комбинированная очистка моторного масла (ММ) в судовых тронковых дизелях широко распространена – необходимость обеспечения их ресурсосберегающей эксплуатации и достижения (при низких расходах горюче-смазочных материалов – ГСМ) длительных сроков службы между переборками двигателя и до капитального ремонта [2, 6]. Применение в форсированных двигателях внутреннего сгорания (ДВС) термостойких смазочных масел с высокими антиокислительными и моюще-диспергирующими свойствами, легированных зольными присадками, приводит (из-за снижения эффективности их очистки штатными фильтрами) к повышенному изнашиванию деталей цилиндропоршневой группы, что способствует интенсификации угара и увеличивает общий расход ММ [1, 4].

Кардинальная мера в устранении этого недостатка – замена штатных фильтров грубой очистки на полнопоточные маслоочистители с номинальной тонкостью отсева 30–50 мкм [9]. Эффективно защищая многие пары трения (в основном подшипники) ДВС от абразивного изнашивания, полнопоточные фильтры тонкой очистки масла (ФТОМП) не способствуют стабилизации его угара на низком уровне. Он интенсивно растет, особенно при сжигании низкосортных топлив, по причине повышенной скорости изнашивания поршневых колец и цилиндровых втулок [8, 12]. Особенно остро эта проблема проявляется при работе дизелей с высоким наддувом на высокозольных маслах и топливах, получаемых при каталитическом крекинге. Находящиеся в таких топливах алюмосиликаты (катализаторы крекинга) и зольные нерастворимые продукты (НРП) карбонизации масел довольно абразивны и плохо удаляются ФТОМП [6].

Современная тенденция развития средств маслоиспользования в судовых форсированных тронковых дизелях – применение комбинированных систем тонкой очистки масла (КСТОМ), сочетающих достоинства фильтрования и центрифугирования [5]. Фильтры на полном потоке системы смазки (СС) двигателя способны очищать с номинальной тонкостью отсева выше 40 мкм до 200 м³/ч масла, эффективно защищая от задиров тонкостенные вкладыши мотылевых подшипников [7]. При этом для сохранения высокого (более 1000 ч) срока службы полнопоточных фильтрующих элементов (ФЭ) со шторой из целлюлозных материалов низкодиспергированная фаза нерастворимых загрязнений из масла не отфильтровывается, что отрицательно сказывается на его сроке службы и износе поршневых маслоъемных колец.

Глубокая очистка масла от этих продуктов производится центрифугами и центробежными сепараторами (ЦС). Мелкие нерастворимые примеси высокой плотности эффективно отфуговываются в центробежном поле. В основном это продукты изнашивания деталей двигателя, срабатывания присадок и неполного сгорания топлива. Их роль в интенсификации окисления работающего в двигателе масла велика. Для снижения скорости старения ММ мелкодисперсные НРП должны из рабочего тела СС удаляться [6, 12].

В форсированных ДВС средней и повышенной мощности для очистки ММ чаще всего применяются комбинированные маслоочистительные комплексы (КМОК) автоматизированного типа [9]. Полнопоточная очистка масла в них для защиты подшипников от абразивного изнашивания осуществляется саморегенерирующимися фильтрами (СРФ), способными длительно (до 5 тыс. ч) функционировать без обслуживания. Глубокая очистка масла от вредных мелкодисперсных НРП, особенно зольных, происходит в ЦС самоочищающегося типа или в работающем без механизированного выброса отложений из барабана. Такие КМОК особенно важны для судовых энергетических установок с классом автоматизации А1 и А2 и при номинальной мощности двигателя более 3 тыс. кВт [6]. Применение ФТОМП со сменными ФЭ из целлюлозных фильтровальных материалов при прокачке масла через двигатель более чем 100 м³/ч приводит к громоздкости полнопоточного фильтра. В СРФ фильтрование осуществляется через сетки полотняного плетения, в которых поверхностная скорость фильтрации жидкости может быть в 15–120 раз выше, чем в фильтровальных бумагах (картоне) типа БФМ, КФМ, ДРКБ [4].

Разработанная нами методика подбора СРФ при модернизации систем тонкой очистки масла в ДВС [6] предусматривает следующее. Пропускная способность автоматизированного фильтра выбирается из условия соблюдения удельной пропускной способности 10–40 л/кВт. Номинальная тонкость отсева рассчитывается исходя из величины рабочего зазора в подшипниках, уровня форсирования дизеля, качества применяемых ГСМ и требуемого срока необслуживаемой (автономной) работы СРФ [9].

Обоснований к подбору ЦС при комплектации КСТОМ нет. Чаще всего при модернизации системы очистки ММ оставляют ранее используемые ЦС. Насколько они будут удовлетворять возросшим требованиям к очистке масла, неясно. Подбор этого агрегата по пропускной способности, как это практикуется в настоящее время, не позволяет полностью реализовать его возможности и определить влияние на состояние дизеля и старение масла. Также важна оценка отфуговывающей способности сепаратора по удалению НРП.

При байпасном подключении ЦС в СС дизеля наиболее информативным показателем его эффективности может служить индекс производительности Σ , тождественный интенсивности очистки [6]. Этот показатель пропорционален фактору разделения $Fr = \omega^2 R_{cp} / g$ сепаратора (где ω – угловая скорость вращения барабана, рад/с; g – ускорение свободного падения, м/с²) на среднем радиусе R_{cp} тарелок. По отношению центробежного ускорения $\omega^2 R_{cp}$ в барабане сепаратора к ускорению свободного падения g можно судить, насколько интенсивнее неразстворимые загрязнения будут удаляться из масла сепарированием по сравнению с гравитационным отстоем. Произведение фактора разделения на поверхность осаждения F_T тарелок формирует индекс производительности сепаратора $\Sigma = \omega^2 R_{cp} F_T / g$. Этот показатель довольно информативен в оценке разделяющей способности ЦС при центрифугировании жидкости с загрязнителем гетерогенного типа.

Моделирование влияния интенсивности сепарирования смазочного масла на изнашивание дизеля

Анализ эффективности различных КСТОМ позволил нам определить значительную роль ЦС в ресурсосберегающей эксплуатации ДВС, которая состоит в снижении изнашивания основных деталей двигателя вследствие эффективного удаления абразивного загрязнителя – продукта функционирования системы «дизель–топливо–масло–очистка» (ДТМО).

Цель настоящей статьи – определение влияния индекса производительности ЦС на изнашивание судового дизеля.

Эксплуатационные испытания по ресурсосберегающему маслоиспользованию проводились с участием авторов в 2017–2019 годах на судах Дальневосточного бассейна с тронковыми дизелями разного уровня форсирования по среднему эффективному давлению. Моделирование изнашивания двигателя осуществлялось в учебно-научной испытательной лаборатории химмотологии кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского.

На предварительном этапе экспериментов было установлено снижение скорости изнашивания основных деталей ДВС по мере роста показателя Σ . Однако наступает такой момент в балансе загрязнений в СС, когда дальнейшее увеличение индекса производительности ЦС уже не приводит к снижению скорости изнашивания двигателя. Этот показатель стабилизируется, и дальнейшее увеличение Σ нерационально.

Величина Σ_{min} характеризует режим и параметры сепарирования, когда возможности ЦС исчерпываются полностью. Они зависят от состава и режима работы системы ДТМО и проявляются через количественный и качественный дисперсный состав загрязнителя масла, его абразивные свойства и чувствительность трибосопряжений ДВС к этим продуктам.

Для реализации ресурсосберегающего маслоиспользования в судовых тронковых дизелях необходимо определить значение «мощности» (параметра Σ_{min}) сепаратора, способного обеспечить эффективное функционирование системы ДТМО. Состав и характеристику звеньев системы задавали следующим образом. Звено Д (дизель) с позиции влияния на состояние

ММ оценивалось уровнем форсирования двигателя на основном (среднестатистическом) режиме работы – средним эффективным давлением p_{me} , МПа. С повышением наддува интенсифицируется старение масла и показатель p_{me} может выступать фактором, влияющим на эффективность системы ДТМО по ресурсосберегающему критерию [2].

Качество топлива (звено Т) задавалось показателем K_t [2], который характеризует его способность формировать НРП и влиять на состояние смазочного масла в тронковом дизеле. Этот показатель формируется через относительные значения зольности, содержания серы, фракционного и группового составов в сравнении с аналогичными параметрами базового топлива. Показатель K_t характеризует способность топлива вызывать негативные последствия в масле при сжигании в дизеле.

Эксплуатационные свойства унифицированных судовых масел (звено М) задавались величиной щелочности и зольности. Уровень их термоокислительных и моюще-диспергирующих свойств был пропорционален этим показателям [11]. В некотором приближении они могут характеризовать и трибологические (износные) свойства масел.

Возможности звена О (очистка) представлялись приходящимся на единицу эксплуатационной (среднестатистической) мощности двигателя показателем – удельным индексом производительности сепаратора σ_s , m^2/kBt . Скорость удаления из масла НРП пропорциональна этому показателю и хорошо коррелируется с износом двигателя на этапе отфуговывания наиболее абразивной фазы загрязнений [6].

При экспериментальном моделировании эффективности системы ДТМО по критерию изнашивания с целью сокращения объема испытаний было предложено объединить действие звеньев Т и М на двигатель. Из рассмотрения убирались нерациональные их сочетания. Работа двигателя на дистиллятном топливе и масле группы Д2 (ГОСТ 174721-85), а также вариант с топочным мазутом и маслами групп В2, Г2 маловероятны. Для исключения из эксперимента этих сочетаний моделирование осуществлялось с объединением показателей K_t и М в блок K_{tm} , характеризующий совместное действие звеньев Т и М в системе ДТМО на двигатель.

Подбор масла, соответствующего характеристикам топлива и дизеля, – общепринятая тенденция, она зафиксирована в технических условиях на любой ДВС. Моделирование проводилось при оценке совместного влияния на изнашивание двигателя эксплуатационных характеристик топлива и масла, оцениваемых блоком $K_{tm}=10K_t/3m$. Уровень легирования масла многофункциональными присадками оценивался через его зольность ($3m$).

Для моторного эксперимента выбирались наиболее характерные сочетания звеньев Т и М, наблюдаемые в эксплуатации тронковых дизелей на судах. Рангом (-1) обозначено сочетание, включающее судовые дистиллятные топлива ДМА и ДМВ (ГОСТ 32510-2013) и ММ группы Г2 (ГОСТ 12337-87). Типичным представителем этой группы является блок – судовое маловязкое топливо (ТУ 38.101567-87) и масло М-10(14)-Г2(цс).

Рангу «ноль» соответствовали сочетания топлив Ф-12, М-40В (ГОСТ 10585-2013) и RMD (ГОСТ 32510-2013) с маслами группы Д2, имеющими щелочность 18–22 мг КОН/г. Эксперимент проводился на сочетании топлива М-40В и масла М-14-Д2 (цл 20). Верхний уровень (+1) химмотологического комплекса K_{tm} соответствовал использованию судовых низкосортных (остаточных) топлив М-100 (ГОСТ 10585-2013), RMG-300 (ГОСТ 32510-2013) и масел группы Д2 со щелочностью 30–40 мг КОН/г. Для моторного эксперимента использовался блок, включающий топливо М-100 и масло М-14-Д2 (цл 30).

В табл. 1 представлены уровни и интервалы варьирования факторов, формирующих износную модель системы ДТМО. Удельный индекс производительности ЦС регулировался с выводом из работы части его тарелок с помощью постановки заглушек. Трибологические и износные характеристики блока Т–М при воздействии на дизель характерны для условий стабилизации всех направлений старения масла и его загрязнения НРП (с позиций количественного и дисперсного их состава). Средняя нагрузка на двигатели в рассматриваемой системе ДТМО соответствовала 78–85% от номинальной мощности.

Износные характеристики системы ДТМО снимались путем замера износа основных деталей дизеля 2Ч10,5/13 ($n_d=25$ с $^{-1}$) при работе на дизельном топливе Л-0,2-62 (ГОСТ 305-2013) и отработавших маслах с различным сочетанием звеньев системы ДТМО. Длительность каждого этапа испытаний составляла 100 ч. Угар масла в лабораторном дизеле составлял 1,7–2,1 г/(кВт·ч). Режимы нагружения двигателя соответствовали типовой методике моторных испытаний при снятии трибологических характеристик отработанного масла. Его состояние оценивали по ОСТ 24.060.09-89 [6]. Методика переноса этих данных на изнашивание дизеля апробирована в [3, 12].

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			Нижний (-1)	Основной (0)	Верхний (+1)
Удельный индекс производительности ЦС σ_c , м ² /кВт	x_1	0,3	0	0,3	0,6
Качество химмотологического комплекса K_{TM} , отн. ед.	x_2	1,5	1,5	3	4,5
Среднее эффективное давление p_{me} , МПа	x_3	0,75	0,5	1,25	2

Износ поршневых колец и вкладышей мотылевых подшипников определяли взвешиванием на аналитических весах ВЛА-200 по потере их массы за этап испытаний. Износ цилиндровых втулок замеряли с использованием метода искусственных баз – прибора УПОИ-6 с нанесением лунок по шести образующим. При формировании обобщенного показателя I весомость износа каждой группы деталей двигателя 2Ч10,5/13 модельной установки принята одинаковой. Перевод этого показателя в безразмерный вид (%) осуществлялся через параметры изнашивания каждой группы деталей дизеля на базовом этапе лабораторных испытаний при закреплении рассматриваемых факторов системы ДТМО на среднем (нулевом) уровне. Моделирование эффективности этой системы осуществлялось по критерию I , под которым понималась ее износная характеристика, зафиксированная оценкой триботехнических (износных) свойств модельной фазы звена М.

Для нахождения зависимости I (σ_c , K_{TM} , p_{me}) был построен некомпозиционный план второго порядка для трех факторов 3^3 (табл. 2). Преимущество этого плана заключается в наличии большого числа нулей, что значительно упрощает вычисление коэффициентов модели. В центре плана, т.е. там, где все факторы находятся на нулевых уровнях (x_1 , x_2 и x_3 равны нулю), было проведено три опыта – 5, 10 и 15.

Коэффициенты модели I (ДТМО) определены с помощью метода наименьших квадратов. Для вычисления коэффициентов полинома второй степени получены формулы [10], которые для трех факторов имеют вид

$$b_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{u=1}^3 y_{0u}; \quad b_i = A \sum_{j=1}^{15} x_{ij} y_j; \quad b_{il} = D \sum_{j=1}^{15} x_{ij} x_{lj} y_j;$$

$$b_{ii} = B \sum_{j=1}^{N=15} x_{ij}^2 y_j + C \sum_{i=1}^{k=3} \sum_{j=1}^{N=15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{pn_0} \sum_{u=1}^3 y_u,$$

где $n_0 = 3$ – число опытов в центре плана; u – номер параллельного опыта в центре плана; y_u – значение функции отклика в u -м опыте; $N = 15$ – число опытов в матрице планирования; j – номер опыта в матрице планирования; i, l – номера факторов; x_{ij} , x_{lj} – кодированные

значения i -го и l -го факторов в j -м опыте; y_j – значение функции отклика в j -м опыте; k – число факторов; $A=1/8$; $B=1/4$; $B_1=13/48$; $C=-1/16$; $D=1/4$; $p=2$ [10].

Таблица 2

Матрица некомпозиционного плана второго порядка для трех факторов

Опыт, №	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y_j	$\hat{y}_j$	$(y_j - \hat{y}_j)^2$
1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	114,4	116,6	4,84
2	1	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0	56,8	53,7	9,61
3	1	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0	213,1	216,2	9,61
4	1	-1	-1	0	1	0	0	1	1	0	110,7	108,5	4,84
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98,2	100,0	3,24
6	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	99,5	98,4	1,21
7	1	1	0	-1	0	-1	0	1	0	1	81,7	83,7	4,00
8	1	-1	0	1	0	-1	0	1	0	1	216,6	214,6	4,00
9	1	-1	0	-1	0	1	0	1	0	1	120,9	122,0	1,21
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	103,3	100,0	10,89
11	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	198,7	197,6	1,21
12	1	0	1	-1	0	0	-1	0	1	1	133,7	129,5	17,64
13	1	0	-1	1	0	0	-1	0	1	1	93,7	97,9	17,64
14	1	0	-1	-1	0	0	1	0	1	1	57,4	58,5	1,21
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98,5	100,0	2,25
b_i	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}	$S_E = \sum_{u=1}^3 (y_u - \bar{y}_u)^2 = 16,38;$ $S_R = \sum_{j=1}^{15} (y_j - \hat{y}_j)^2 = 93,4$		
	100,1	-38,6	42,7	26,9	-11,2	-19,5	7,2	16,3	7,5	13,4			

Дисперсию воспроизводимости s_y^2 и адекватности $s_{ад}^2$ вычисляли через сумму квадратов S_E отклонений эмпирических значений y_u от средних $\bar{y}_u$ в центре плана и S_R – сумму квадратов отклонений эмпирических значений y_j функции отклика от ее значений $\hat{y}_j$, вычисленных по модели во всех точках плана (см. табл. 2):

$$s_y^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \left[\sum_{u=1}^{N=3} (y_u - \bar{y}_u)^2 \right] = \frac{16,38}{2} = 8,19;$$

$$s_{ад}^2 = \frac{S_R - S_E}{N - k - (n_0 - 1)} = \frac{93,4 - 16,38}{3} = 25,67.$$

Дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии, определяли по формулам [10]:

$$s^2\{b_i\} = A s_y^2; \quad s^2\{b_{il}\} = D s_y^2; \quad s^2\{b_{ii}\} = B_1 s_y^2.$$

Значение (табл. 3) дисперсий и доверительных интервалов коэффициентов уравнения регрессии, вычисленных при числе степеней свободы $f_1 = (n_0 - 1) = 2$ и 5% уровне значимости ($t = 4,3$), указывают на их статистическую значимость.

Таблица 3

Дисперсия и доверительный интервал коэффициентов регрессии

Обозначение коэф-фициента	b_i	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Дисперсия	$s^2\{b_i\}$	2,73	1,02	1,02	1,02	2,05	2,05	2,05	2,22	2,22	2,22
Доверительный интервал	Δb_i	7,104	4,35	4,35	4,35	6,15	6,15	6,15	6,41	6,41	6,41

Модель изнашивания дизеля при его функционировании в системе ДТМО для идентификации эффективности системы ДТМО по показателю I в соответствии с расчетными данными (табл. 2) может быть представлена уравнением:

$$y = 100 - 38,6x_1 + 42,7x_2 + 26,9x_3 - 11,2x_1x_2 - 19,5x_1x_3 + 7,2x_2x_3 + 7,5x_2^2 + 13,4x_3^2. \quad (1)$$

Адекватность полученной модели была проверена по критерию Фишера:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2} = \frac{25,67}{8,19} = 3,14.$$

Согласно рекомендациям [9] при 5% уровне значимости и числе степеней свободы $f_1 = 2$; $f_2 = 3$ табличное значение критерия Фишера принято равным $F_T = 19,2$. Сопоставив расчетный критерий Фишера с его табличным значением $F_p < F_T$, можно сделать вывод об адекватности модели.

Обсуждение модели изнашивания дизеля при его функционировании в системе ДТМО

Анализ уравнения (1) показывает, что наибольшее влияние на функцию отклика y оказывает, если учитывать линейные и квадратичные эффекты, фактор x_1 . Незначительно уступает ему при рассматриваемом раскладе фактор x_3 . Если же анализировать только линейные эффекты, то несомненным лидером выступает фактор x_2 . Это заключение вытекает из анализа коэффициентов b_1 , b_2 и b_3 .

Перевод факторов в натуральное выражение был осуществлен через соотношения $x_1 = (\sigma_c - 0,3)/0,3$, $x_2 = (K_{TM} - 3)/1,5$ и $x_3 = (p_{me} - 1,25)/0,75$. Это позволило представить модель в следующем виде:

$$I = 59,9 - 54,3\sigma_c + 7,9K_{TM} - 16,9p_{me} - 24,9\sigma_c K_{TM} - 86,7\sigma_c p_{me} + 6,4K_{TM} p_{me} + 181,1\sigma_c^2 + 3,3K_{TM}^2 + 23,8p_{me}^2. \quad (2)$$

Влияние удельного индекса производительности центробежного сепаратора σ_c и химмотологического блока K_{TM} (качества топлива и масла) на изнашивание дизеля при уровне его форсирования p_{me} , равном 1,25 МПа (рис. 1), показывает равноценность их действия на рассматриваемый показатель. Наименьшее значение $I=51,26\%$ наблюдается при $\sigma_c=0,6$ м²/кВт и $K_{TM}=1,5$. Наибольшее $I=206,8\%$ характерно для $K_{TM}=4,5$ при отсутствии в СС сепаратора ($\sigma_c = 0$).

Зависимость I от σ_c характеризуется снижением изнашивания при увеличении индекса производительности ЦС, что согласуется с эксплуатационными наблюдениями. В отличие от рассчитанных по уравнению (2) значений I за пределами факторного пространства, сепарирование масла сопровождается стабилизацией на минимальном уровне значения этого показателя при достижении σ_{min} . Дальнейшее увеличение индекса производительности сепаратора противоизносного эффекта не дает. Участок реальной поверхности I (σ_c , K_{TM}) при σ_c больше σ_{min} отличается от расчетного, так как здесь I остается на постоянном уровне I_{min} , характерном для конкретного значения K_{TM} . Это указывает на стабилизацию массодисперсного обмена

НРП в масле, когда из него сепарированием эффективно удаляются наиболее опасные для трибосопряжений ДВС загрязнения. Перегиб функции $I(\sigma_c, K_{TM})$ обусловлен идентификацией их полиномом, поэтому координаты I_{min} , σ_{min} характеризуют состояние системы ДТМО, когда возможности сепаратора использованы полностью.

Рис. 1. Влияние удельного индекса производительности ЦС и химмотологического блока Т–М на изнашивание дизеля ($p_{me}=1,25$ МПа).

Ограничение параметра σ_c значением $0,6 \text{ м}^2/\text{кВт}$ при моделировании системы ДТМО вызвано необходимостью зафиксировать динамику снижения I по мере увеличения индекса производительности сепаратора с выносом за пределы факторного пространства неработающей части поверхности отклика. В данном случае две точки минимума из трех, если рассматривать K_{TM} на нижнем, основном и верхнем уровнях, находятся за пределами факторного пространства.

В свою очередь, с ростом показателя K_{TM} изнашивание деталей дизеля возрастает, что указывает на превалирующее действие на дизель по сравнению с M фактора K_T . Улучшение эксплуатационных свойств масла (фактора M) не способно полностью нейтрализовать отрицательное влияние топлива на I при «утяжелении» его фракционного и группового составов.

Наименьшее изнашивание $I = 51,26\%$ в пределах факторного пространства (см. рис. 1) наблюдается в точке $K_{TM} = 1,5$; $\sigma_c = 0,552 \text{ м}^2/\text{кВт}$. При $K_{TM} = 3$ на том же двигателе с $p_{me} = 1,25$ МПа минимальное изнашивание $I = 76,08\%$ обеспечивает $\sigma_c = 0,655 \text{ м}^2/\text{кВт}$. В точке $\sigma_c = 0,758 \text{ м}^2/\text{кВт}$ при работе на тяжелом топливе и соответствующем ему масле ($K_{TM} = 4,5$) изнашивание $I = 101,1\%$. Здесь, чтобы обеспечить минимальное изнашивание, необходимо более интенсивное сепарирование ММ.

Рис. 2 иллюстрирует зависимость I от σ_c и p_{me} при $K_{TM} = 3$. Минимальное значение износа $I = 77,84\%$ в пределах факторного пространства соответствует значениям $\sigma_c = 0,476 \text{ м}^2/\text{кВт}$ и $p_{me} = 0,5$ МПа. Для двигателя со средним эффективным давлением $p_{me} = 2$ МПа при использовании топлива и масла, формирующих блок $K_{TM} = 3$, минимальное изнашивание дизеля $87,46\%$ обеспечит КСТОМ с сепаратором, удельный индекс производительности которого равен $\sigma_c = 0,835 \text{ м}^2/\text{кВт}$. Установка более «мощного» сепаратора не имеет смысла, так как дальнейшее увеличение σ_c не приводит к уменьшению I . Для ДТМО с $p_{me} = 2$ МПа и $K_{TM} = 4,5$ σ_{min} соответствует $0,938 \text{ м}^2/\text{кВт}$. При этом $I_{min} = 123\%$.

Для определения значений удельного индекса производительности ЦС, при котором изнашивание дизеля стабилизируется на минимальном уровне (точки перегиба зависимости $I(\sigma_c, K_{TM}, p_{me})$), функция (2) была исследована на экстремум. Приравняв первую производную $dI/d\sigma_c$ нулю, получили следующее выражение для σ_{min} :

$$\sigma_{min} = 0,15 + 0,07K_{TM} + 0,24p_{me}. \quad (3)$$

Рис. 2. Формирование функции отклика I в системе ДТМО в зависимости от удельного индекса производительности ЦС и среднего эффективного давления дизеля при $K_{тм}=3$.

Для выражении минимального изнашивания через $K_{тм}$ и $p_{ме}$ заменим в формуле (2) σ_c на σ_{min} . В результате преобразования имеем:

$$I_{min} = 55,8 + 7,5K_{тм} - 29,9p_{ме} + 6,1K_{тм}p_{ме} + 2,4K_{тм}^2 + 13,4p_{ме}^2. \quad (4)$$

Иллюстрация (рис. 3) зависимостей (3) и (4) показывает наибольшее влияние на I_{min} химмотологического блока $K_{тм}$. Полностью компенсировать повышение изнашивания дизеля при сжигании низкосортных остаточных топлив использованием масел с высокими моторными свойствами затруднительно. Интенсивным сепарированием ММ при $K_{тм} = 3$ можно значительно ослабить действие форсирования дизеля наддувом на его изнашивание. В наибольших пределах меняются значения σ_{min} и I_{min} при одновременном изменении факторов $K_{тм}$ и $p_{ме}$ от нижнего до верхнего уровней. Вклад в варьирование σ_{min} при изменении факторов $K_{тм}$ и $p_{ме}$ в пределах от $x_{2,3}=-1$ до $x_{2,3}=+1$ примерно одинаковый. Наиболее чувствительна реакция I_{min} на σ_{min} по блоку $K_{тм}$.

Рис. 3. Влияние факторов системы ДТМО на стабилизацию изнашивания дизеля на минимальном уровне.

Сравнимость результатов моделирования эффективности системы ДТМО по критерию I путем идентификации трибологических (износных) характеристик работающего ММ [3] с данными натурных измерений изнашивания основных деталей дизеля довольно высока. Сравнительные показатели изнашивания дизеля 9L28/32 А-F (9CH28/32), $P_{ен} = 2200$ кВт, $n_d = 10$ с⁻¹, $p_{me} = 1,93$ МПа, оснащенного КСТОМ с фильтром СРФ-60 и ЦС, по отношению к режиму работы СС без сепарирования масла (при среднестатистической нагрузке 85% от номинальной) вполне сопоставимы с результатами моделирования (рис. 4).

Рис. 4. Изнашивание дизеля 9L28/32 А-F ($p_{me} = 1,65$ МПа, $K_{TM} = 3$) в зависимости от интенсивности сепарирования масла.

Зависимость относительного износа основных деталей среднеоборотного дизеля при интенсификации сепарирования ММ по отношению к их износу при очистке масла только полнопоточным фильтрованием имеет такой же вид, как и при расчете по уравнению (2). В опытах суммы квадратов отклонений значений I от расчетной зависимости (2) и зависимости экспериментальной, полученной аппроксимацией результатов судовых испытаний по экспоненте (коэффициент детерминации $R^2=0,952$), практически одинаковы. Расчетная зависимость $I(\sigma_c)$, за исключением хвостовой части, полностью располагается в поле рассеивания экспериментальных данных, приведенных с 95% доверительной вероятностью. Результаты моделирования и судового эксперимента принадлежат одной генеральной совокупности.

Практическая ценность результатов моделирования: возможность по зависимости (3) подобрать для системы ДТМО центробежный сепаратор, который сможет обеспечить ресурсосберегающее маслоиспользование. Если ММ полностью соответствует параметрам дизеля по уровню форсирования и применяемому топливу, возможно его использование в течение 3 тыс. ч и более без смены. При этом обеспечивается длительный (3–5 тыс. ч) период необслуживаемой (автономной) работы СРФ [5]. Выбор ЦС с параметрами $\sigma_c \geq \sigma_{min}$ показал обоснованность рассматриваемого подхода и высокую работоспособность различных систем ДТМО по сохранению ресурсных показателей дизелей при эксплуатации на различных топливах и маслах. Расчетные зависимости (2)–(4) получены для условий среднестатистических значений параметров старения ММ, обеспечивающих их бессменную работу в тронковых дизелях при угаре в пределах 0,7–2,5 г/(кВт·ч).

Выводы

1. Разработана расчетно-экспериментальная износная модель судового тронкового дизеля с комбинированной очисткой ММ, позволяющая определять индекс производительности центробежного тарельчатого сепаратора, способного обеспечить ресурсосберегающую эксплуатацию двигателя в системе ДТМО с широким уровнем функциональных свойств каждого звена.

Выбор индекса производительности сепаратора осуществляется из условия полной реализации его возможностей, когда дальнейшее увеличение этого показателя не приводит к снижению скорости изнашивания двигателя, так как возникает наиболее приемлемый для трибосопряжений качественно-количественный баланс поступающих в смазочное масло и удаляемых центробежным очистителем абразивных продуктов.

2. Идентификация на моторной установке (2Ч10,5/13) износных характеристик загрязненного нерастворимыми продуктами работающего смазочного масла как результат его старения от совместного действия звеньев системы ДТМО показала полную тождественность трибологических параметров дисперсной фазы ММ с интегральной скоростью изнашивания основных деталей дизеля. Хорошая согласованность результатов износных испытаний дизеля при эксплуатации на судах, а также моторной установки в лаборатории указывает на адекватность разработанной модели изнашивания ДВС, что позволяет учитывать влияние на этот процесс индекса производительности сепаратора, величины K_{TM} химмотологического блока и уровня форсирования двигателя.

Вклад авторов в статью: Н.С. Молоков – постановка цели исследования, планирование и обработка экспериментов, проведение моделирования, работа с текстом, оформление графического материала; Г.П. Кича, А.В. Надежкин – разработка методик контроля состояния моторного масла и изнашивания судовых дизелей, выбор объектов испытаний, анализ результатов исследований, работа с источниками и с текстом. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буяновский И.А., Лашхи В.Л., Самусенко В.Д., Доценко А.И. Трибологические характеристики сульфатов кальция как детергентов к моторным маслам // Трение и износ. 2017. Т. 38, № 2. С. 100–106.
2. Викулов С.В. Обеспечение надежной и ресурсосберегающей эксплуатации судовых дизелей // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 3. С. 111–115.
3. Викулов С.В. Трибологическая оценка состояния дизелей по общей загрязненности масла // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 2. С. 289–292.
4. Горелик Г.Б., Кончаков Е.И., Викулов С.В. Повышение эффективности топливно- и маслоиспользования в судовых энергетических установках // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. № 1-2. С. 92–96.
5. Кича Г.П., Надежкин А.В., Бойко С.П. Результаты эксплуатационных испытаний саморегенерирующегося фильтра в судовых дизелях в составе комбинированного маслоочистительного комплекса // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2019. Т. 2, № 4. С. 718–726.
6. Кича Г.П., Перминов Б.Н., Надежкин А.В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях. Владивосток: Изд-во Морского гос. ун-та им. адм. Г.И. Невельского, 2011. 372 с.
7. Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л., Макаров В.Н. Влияние эксплуатационных факторов на отказы подшипников скольжения коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей и пути повышения их надежности // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2016. № 1(35). С. 129–138.
8. Леонтьев Л.Б., Погодаев А.В., Болотова В.П. Особенности изнашивания втулок цилиндров судовых среднеоборотных дизелей // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 2, № 6. С. 1088–1095.
9. Надежкин А.В., Кича Г.П. Трибомониторинг и трибодиагностика судовых дизелей. Mauritius: Palmarium Academic Publishing, 2018. 422 с.

10. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
11. Чудиновских А.Л., Лашхи В.Л. Моторное масло как полноправный элемент конструкции двигателя // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 4. С. 14–16.
12. Чудиновских А.Л., Лашхи В.Л., Тонконогов Б.П. Прогнозирование износа основных узлов и деталей двигателей внутреннего сгорания по состоянию моторного масла // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 1. С. 37–41.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 4/45
Marine Engines and Auxiliary Machinery

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-5>

Kicha G., Molokov N., Nadezkin A.

GENNADIY KICHA, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the department (corresponding author), SPIN: 2469-6099, ResearcherID: W-2855-2017, ORCID: 0000-0001-8298-9956, ScopusID: 7801430889, kicha@msun.ru
 NIKOLAI MOLOKOV, Postgraduate Student, SPIN: 8121-6450, nikolaimolokov2014@mail.ru
 ANDREY NADEZKIN, Doctor of Engineering Sciences, Professor, ResearcherID: V-8426-2017, nadezkin@msun.ru
Maritime State University named after G.I. Nevelskoy
 Vladivostok, Russia

Selection centrifugal separator performance index for combined oil refining complexes of marine trunk diesel engines

Abstract: The prospects of combined cleaning of engine oil in ship trunk diesel engines using self-regenerating filters and separators are shown. This cleaning method is especially effective for high-powered, highly automated engines with low oil waste, operating on high-viscosity residual fuels. The importance of reliable protection of engine bearings from abrasive wear by full-flow oil filtration is substantiated. The centrifugal separator, operating according to the bypass scheme, effectively removes the finely dispersed phase of insoluble contaminants from the lubrication system, which ensures the functioning and increases the autonomy of the self-regenerating filter, and also slows down the aging of the lubricating oil. The necessity of selecting a separator according to the specific performance index, which ensures resource-saving oil use in the “diesel-fuel-oil-cleaning” system, is proved. The novelty of the experimental modeling of the efficiency of this system consists in evaluating the tribological indicators of the lubricating oil used in a marine diesel engine, reflecting the interaction of the links under consideration, on a laboratory motor unit, and establishing their connection with engine wear. The efficiency of the presented system is identified by the criterion of diesel wear, which makes it possible to use its computational and experimental model to determine the parameters of a centrifugal separator so that it meets the requirements of the considered interacting links. The model has been transformed into an expression for calculating the specific index of the separator performance per unit of engine power, which ensures minimum engine wear, permanent operation of the lubricating oil and an autonomous service life of a self-regenerating filter of at least 3 thousand hours. Full realization of the advantages of automated fine cleaning of engine oil by combining filtration and centrifugation, are applicable for marine diesel engines of medium and high speed with a capacity of up to 20 thousand kW.

Keywords: resource-saving oil use, self-regenerating filter, centrifugal separator, diesel wear, combined oil purification, lubrication system, separator performance index, optimization of oil separation

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Article: received: 20.07.2020; reviewed: 17.08.2020; accepted: 09.09.2020; financing: Maritime State University named after G.I. Nevelskoy.

REFERENCES

1. Buyanovskiy I.A., Lashkhi V.L., Samusenko V.D., Dotsenko A.I. Tribological characteristics of calcium sulfates as detergents for motor oils. *Friction and wear*. 2017;38(2):100–106.
2. Vikulov S.V. Ensuring reliable and resource-saving operation of ship diesel engines. *Scientific Problems of transport in Siberia and the Far East*. 2014(3):111–115.
3. Vikulov S.V. Tribological assessment of the state of diesel engines based on total oil contamination. *Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East*. 2010(2):289–292.
4. Gorelik G.B., Konchakov E.I., Vikulov S.V. Improving the efficiency of fuel and oil use in ship power plants. *Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East*. 2017(1-2):92–96.
5. Kicha G.P., Nadezkin A.V., Boyko S.P. Results of operational tests of a self-regenerating filter in marine diesel engines as part of a combined oil-cleaning complex. *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2019;2(4):718–726.
6. Kicha G.P., Perminov B.N., Nadezkin A.V. Resource-saving oil use in marine diesel engines. Vladivostok, Publishing House of Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy, 2011, 372 p.
7. Leontiev L.B., Leontiev A.L., Makarov V.N. Influence of operational factors on failures of sliding bearings of crankshafts of marine medium-speed diesel engines and ways to improve their reliability. *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2016(35):129–138.
8. Leontiev L.B., Pogodaev A.V., Bolotova V.P. Features of wear of cylinder liners of marine medium-speed diesel engines. *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after V.I. Admiral S.O. Makarov*. 2019;2(6):1088–1095.
9. Nadezkin A.V., Kicha G.P. Tribomonitoring and tribodiagnostics of marine diesel engines. Mauritius, Palmarium Academic Publishing, 2018, 422 p.
10. Spiridonov A.A. Planning an experiment in the study of technological processes. M., Mashinostroenie, 1981, 184 p.
11. Chudinovskikh A.L., Lashkhi V.L. Motor oil as a full-fledged element of the engine design. *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. 2013(4):14–16.
12. Chudinovskikh A.L., Lashkhi V.L., Tonkonogov B.P. Forecasting the wear of the main units and parts of internal combustion engines based on the state of engine oil. *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. 2013(1):37–41.