

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

SHIP POWER PLANTS AND PROPULSION SYSTEMS

Научная статья
УДК 621.892.096.1:65.011.2
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-45-57>
EDN TEXRST

Моделирование и оценка интенсивности старения моторного масла в судовых тронковых дизелях при их наддуве

*Геннадий Петрович Кича, Максим Анатольевич Серебряков[✉],
Руслан Алексеевич Крючков, Андрей Вениаминович Надежкин*

*Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Россия, goryn76@yandex.ru[✉]*

Аннотация. Приведена расчетно-экспериментальная модель старения смазочного масла по разным направлениям, учитывающая влияние на интенсивность его деградации степени форсирования (тепловой нагрузки) и технического состояния дизеля, качества (моторной группы) смазочного продукта и содержания серы в топливе. Новизна в оценке старения смазки в тронковом дизеле при форсировании его наддувом состоит в формировании тепловой нагрузки на масляную пленку, определяющей скорость старения моторного масла на цилиндрической втулке двигателя. Сообщается, как экспериментально фиксируется и осредняется по высоте втулки и углу поворота коленчатого вала за рабочий цикл двигателя плотность теплового потока, воздействующего на ометаемую поршнем поверхность масляной пленки. Идентифицировано влияние рассматриваемых факторов на удельную скорость старения смазочного масла, приходящуюся на единицу площади контактируемой с газами поверхности втулки в направлении срабатывания присадок, падения щелочности, роста кислотности, смолообразования и накопления нерастворимых продуктов. Проиллюстрированы линии равных значений гиперповерхностей функций отклика по удельной интенсивности срабатывания щелочности и образования нерастворимых продуктов смолообразования и роста кислотности. Сформированы требования к моторным маслам по уровню легирования многофункциональными присадками в зависимости от степени форсирования (среднего эффективного давления) судовых тронковых дизелей наддувом. В результате проведенного анализа скорости старения моторного масла в современных судовых дизелях со средним и высоким наддувом подтверждена целесообразность применения в них унифицированных масел типа М-10(14)Г₂ЦС и М-14(16)ДЦЛ20 с многофункциональными присадками МАСК и ПМС при сжигании дистиллятных топлив и их смесей с мазутами с содержанием серы до 0,5 %.

Ключевые слова: тронковый дизель, смазочное масло, моделирование процесса старения масла, деградация моторного масла, параметры старения масла, тепловая нагрузка на масло, многофункциональные присадки к маслам, планирование эксперимента

Для цитирования: Кича Г. П., Серебряков М. А., Крючков Р. А., Надежкин А. В. Моделирование и оценка интенсивности старения моторного масла в судовых тронковых дизелях при их наддуве // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 1. С. 45–57. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-45-57>. EDN TEXRST.

Original article

Modeling and evaluation of the engine oil aging intensity in marine trunk diesel engines when they are supercharged

Gennadiy P. Kicha, Maksim A. Serebryakov[✉], Ruslan A. Kriuchkov, Andrey V. Nadezhkin

Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russia, goryn76@yandex.ru[✉]

Abstract. A computational and experimental model of the aging of lubricating oil in different directions is presented, taking into account the influence on the intensity of its degradation of the degree of forcing (thermal load) and the technical condition of diesel, the quality (motor group) of the lubricant product and the sulfur content in the fuel. The novelty in assessing the aging of the lubricant in a tank diesel engine when forcing it by supercharging consists in the formation of a thermal load on the oil film, which determines the aging rate of the engine oil on the cylinder sleeve of the engine. It is reported how the density of the heat flux acting on the surface of the oil film swept by the piston is experimentally fixed and averaged over the height of the sleeve and the angle of rotation of the crankshaft during the engine operating cycle. The influence of the factors under consideration on the specific rate of aging of lubricating oil per unit area of the sleeve surface in contact with gases in the direction of additive activation, decrease in alkalinity, increase in acidity, tar formation and accumulation of insoluble products has been identified. The lines of equal values of the hypersurfaces of the response functions for the specific intensity of the alkalinity response and the formation of insoluble products of tar formation and acidity growth are illustrated. The requirements for engine oil have been formed according to the level of alloying with multifunctional additives, depending on the degree of boost (average effective pressure) of supercharged marine tank diesels. As a result of the analysis of the aging rate of engine oil in modern marine diesel engines with medium and high boost, the expediency of using unified type oils in them has been confirmed M-10(14)G₂CS and M-14(16)DCL20 with multifunctional additives MASK and PMS for the combustion of distillate fuels and their mixtures with fuel oils with a sulfur content of up to 0.5%.

Keywords: trunk diesel, lubricating oil, modeling of oil aging, degradation of engine oil, oil aging parameters, thermal load for oil, multifunctional oil additives, experiment planning

For citation: Kicha G. P., Serebryakov M. A., Kriuchkov R. A., Nadezhkin A. V. Modeling and evaluation of the engine oil aging intensity in marine trunk diesel engines when they are supercharged. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2024;1:45-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-45-57>. EDN TEXRST.

Введение

При обеспечении ресурсосберегающей эксплуатации дизеля необходимо прогнозирование состояния смазочного масла для определения срока его службы и осуществления своевременной смены по браковочным показателям. Смена масла по данным показателям способствует его экономии, т. к. регламент обслуживания системы смазки (СС) рассчитан на конкретные режимы нагружения и условия эксплуатации дизеля, которые не всегда соблюдаются. Поэтому при регламентном обслуживании возможна неполная реализация эксплуатационных свойств смазочного масла или повышенное изнашивание и нагарообразование дизеля, что приводит к потере надежности его работы. Этот аспект особенно важен при форсировании дизеля наддувом, когда прогнозирование состояния моторного масла (ММ) теоретическими методами проблематично. В таких случаях проводят трудоемкие моторные испытания двигателя внутреннего сгорания (ДВС) для определения скорости старения (деградации) масла по разным направлениям.

Показатели старения в значительной мере зависят от форсировки двигателя и характеристик используемых горюче-смазочных материалов [1, 2].

Цель рассматриваемых в статье исследований состояла в экспериментальном моделировании главных направлений старения смазочного масла в дизеле при его форсировании путем повышения давления наддувочного воздуха. Применение разрабатываемой модели позволит прогнозировать состояние масла в СС уже на стадии проектирования дизеля и задавать самые выгодные параметры маслоиспользования [3].

По результатам моделирования можно будет также рассчитать кинетику старения смазочного масла, оценивать запас качества и эффективность его использования в заданных условиях, не прибегая к моторным испытаниям. На базе полученной модели при наддуве ДВС и варьировании параметров его рабочего процесса и системы охлаждения, совершенствовании конструкции поршня, масло-съемных и компрессионных колец возможен подбор состава и функциональных характеристик ММ

для достижения надежной и экономичной работы двигателя.

Повышение мощности и экономичности судового форсированного тронкового дизеля наддувом ужесточает условия функционирования его смазочной системы, что приводит, особенно при использовании остаточных высоковязких топлив, к интенсификации старения ММ. Прогноз состояния смазочного масла с целью своевременной смены в этом случае затруднен, т. к. существующие показатели удельной скорости его старения, которые чаще всего нормируются относительно мощности двигателя, не стабильны и имеют большой разброс, поэтому недостаточно достоверны [1]. Сравнение состояния ММ в большинстве среднеоборотных дизелей при их наддуве более точно аппроксимируется не с мощностью и, следовательно, со средним эффективным давлением, характеризующим механическое нагружение двигателя, а с тепловым воздействием на масляную пленку, находящуюся на зеркале цилиндра [1, 4].

Наибольшее воздействие термоокислительного импульса (теплового потока) масло испытывает при расположении в виде тонкой пленки на внутренней поверхности цилиндрической втулки в высокотемпературной (верхней) ее зоне. Особенно интенсивно разложение присадок наблюдается в тонком слое масла, сформированном маслосъемными кольцами, открываемом поршнем и подвергаемом воздействию продуктов сгорания в присутствии избыточного кислорода, как при сжатию рабочего тела, так и на такте расширения. На масляной пленке усиленно происходит окисление и деструкция углеводов, терморекинг, полимеризация и карбонизация масла.

Интенсивность старения масла, поступающего на цилиндрическую втулку, зависит не только от величины усредненного теплового потока, действующего на единицу поверхности масляной пленки, но и от общей поверхности пленки, подверженной

тепловому воздействию. Немаловажную роль при этом играет и продолжительность воздействия. Поэтому ометаемая поршнем поверхность в системе «время – площадь», умножаемая на усредненный тепловой поток за рабочий цикл двигателя, характеризует теплоту, которая проходит через масляную пленку в течение часа и вызывает остаточные явления в масле, т. е. его старение.

Новый подход к оценке интенсивности (скорости) старения смазочного масла по i -му направлению в соответствии с тепловым воздействием на пленку смазки на зеркале цилиндра [4, 5] состоит в представлении ее через удельный показатель A_i относительно поверхности цилиндров двигателя, ометаемой поршнями. В этом случае между удельной интенсивностью старения, приходящейся на единицу поверхности масляной пленки, m^2 , в единицу времени, ч, и скоростью старения масла a_i всего двигателя существует следующая связь:

$$a_i = \pi D S z i_{ц} A_i, \quad (1)$$

где A_i – удельная скорость старения масла по i -му направлению, $г/(m^2 \cdot ч)$, $мг KOH/(m^2 \cdot ч)$; D, S – диаметр и ход поршня двигателя, $м$; z – коэффициент тактности; $i_{ц}$ – число цилиндров.

Эта связь аналогична общему воздействию теплового потока на масляную пленку цилиндров ДВС при периодическом ее контакте с газами рабочего процесса двигателя, формирующего удельную тепловую нагрузку на детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ).

Планирование, проведение и обработка экспериментов при оценке старения смазочного масла на моторном стенде

Кинетику процессов старения ММ по разным направлениям при условии непрерывного долива свежего масла для компенсации угара можно выразить следующим уравнением [1, 6]:

$$c_i = c_{i0} \left[\frac{Q_y + (Q_{\phi} \Phi_{\phi})_i}{G_0} \tau \right] + \frac{Q_d c_{ид} \pm a_i}{Q_y + (Q_{\phi} \Phi_{\phi})_i} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{Q_y + (Q_{\phi} \Phi_{\phi})_i}{G_0} \tau \right] \right\}, \quad (2)$$

где $c_{i0}, c_i, c_{ид}$ – начальная, текущая ко времени τ и в доливаемом масле концентрация i -го продукта старения ММ, отн. ед.; a_i – скорость старения масла по i -му направлению, $г/ч$, $мг KOH/ч$; $Q_y, Q_d, (Q_{\phi} \Phi_{\phi})_i$ – скорость угара (долива) масла и интенсивность его очистки (фильтрования) по i -му компоненту, $г/ч$, $мг KOH/ч$; G_0 – вместимость СС (масса масла в картере двигателя), $г$; τ – время (период) работы масла (двигателя), ч.

Уравнение (2) справедливо при работе ММ в режимах непрерывного (автоматического) вос-

полнения его угара. Оно также пригодно для условий эксплуатации двигателя с периодическим, но довольно частым ($Q_y \tau_d < 0,1 G_0$) доливом масла для компенсации угара. Поэтому это уравнение можно использовать для расчета срабатывания присадок и накопления продуктов старения ММ в СС большинства ДВС, функционирующих в режиме как непрерывного, но частого долива. При этом в случае убыли полезных компонентов масла показатель a_i в формуле (2) используется со знаком «минус», а при накоплении вредных продуктов – со

знаком «плюс». По мере возрастания Q_y и увеличения периодичности долива τ_d погрешность расчета c_i по предлагаемой формуле увеличивается, но для большинства вариантов маслоиспользования не превышает 10 %. Поэтому ее применение допустимо не только для условий непрерывной компенсации угоревшего масла свежим, но и при периодическом режиме долива.

Экспоненциальное выражение (2) концентрации продуктов старения в масле в функции от времени τ его работы применялось для аппроксимации экспериментальных данных по $c_i(\tau)$ стендовых испытаний на одноцилиндровом отсеке дизеля для расчета показателя a_i с последующим переводом

его в удельный показатель A_i . Реализация поставленной задачи состояла в составлении уравнения суммы квадратов разности между результатами эксперимента и экспоненциальной зависимости в контролируемых точках процесса. Далее определяется экстремум (минимум) составленного уравнения согласно рекомендации [7], для чего необходимо было выразить производную полученной функции по параметру c_i и приравнять ее к нулю. Решение нового уравнения относительно искомого показателя дает возможность при допущении $Q_d = Q_y$ получить следующее окончательное выражение для расчета скорости старения ММ по любому направлению:

$$a_i = \left[Q_y + (Q_\Phi \Phi_\Phi)_i \right] \frac{\sum_{j=0}^N c_{ij} - \sum_{j=0}^N c_{i0} \exp \left[-\frac{Q_y + (Q_\Phi \Phi_\Phi)_i}{G_0} \tau_j \right]}{\sum_{j=0}^N 1 - \exp \left[-\frac{Q_y + (Q_\Phi \Phi_\Phi)_i}{G_0} \tau_j \right]} - Q_y c_{i0}, \quad (3)$$

где j , τ_j – номер пробы отбора масла на анализ и срок его работы к этому моменту, ч; c_{ij} – параметр состояния масла по i -му направлению старения в j -й пробе, отн. ед., мг КОН/г.

В случае, когда концентрация продукта старения в доливаемом масле мала и ею можно пренебречь, расчет a_i необходимо вести по упрощенной формуле

$$a_i = \left[Q_y + (Q_\Phi \Phi_\Phi)_i \right] \frac{\sum_{j=0}^N c_{ij} - \sum_{j=0}^N c_{i0} \left\{ \frac{G_0 + 0,7}{\left[Q_y + (Q_\Phi \Phi_\Phi)_i \right] \tau_d} \right\}}{\sum_{j=0}^N 1 - \exp \left[-\frac{Q_y + (Q_\Phi \Phi_\Phi)_i}{G_0} \tau_j \right]},$$

где τ_d – периодичность долива масла для компенсации угара, ч.

Если учитывать удаление из СС продуктов старения ММ с отбираемыми пробами масла, то необходима коррекция скорости a_i путем введения в формулу (3) при члене $\sum_{j=0}^N c_{ij}$ поправочного коэффициента $K_{пр} = (1 + G_{отб}) / (G_0 - Q_y \tau_d)$ на потери компонентов старения с отборами смазочного продукта на анализ. Обычная величина отбора пробы масла $G_{отб}$ не превышает 0,4 кг и составляет менее сотой доли вместимости G_0 картера двигателя. Поэтому в общем балансе a_i потерями продуктов старения с отборами масла пренебрегают.

Зависимость (3) позволяет определять в СС дизеля с параметрами G_0 , Q_y и $(Q_\Phi \Phi_\Phi)_i$ скорость старения смазочного масла по накоплению нерастворимых примесей и продуктов глубокого окисления (карбонизации углеводородов), образованию смол a_c и «кислых» соединений a_k . По этой же формуле можно рассчитывать a_i , которая будет характери-

зовать срабатывание присадок $a_{п}$, $a_{ш}$, задаваемое через концентрацию их активных компонентов в масле или щелочное число [7, 8].

Результаты анализа старения ММ в тронковых двигателях свидетельствуют о том, что основными факторами, формирующими этот процесс, являются форсировка дизеля и его техническое состояние, качество применяемых смазочных масел и эксплуатационные характеристики топлива. Для планирования экспериментов выделили главные показатели рассматриваемых звеньев системы «дизель – топливо – масло» (ДТМ), оказывающие наиболее существенное влияние на a_i , и представили их в табличной форме с указанием уровней и интервалов варьирования (табл. 1).

Основным из перечисленных факторов является средняя плотность теплового потока $q_{ср}$, действующего на масляную пленку цилиндрической втулки за рабочий цикл двухтактного и на тактах сжатия и рабочего хода четырехтактного двигателя. Такая схема задания тепловой нагрузки обеспечивает универсальность модели старения масла.

Тепловое воздействие на масляную пленку, находящуюся на зеркале цилиндра, рациональнее всего оценивать плотностью теплового потока между рабочим телом (газом) и цилиндровой втулкой.

Тепловую нагрузку на зеркало цилиндра предложено фиксировать экспериментально [9].

Таблица 1

Table 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Levels and intervals of variation of factors

Фактор	Обозначение		Единица измерения	Уровень			Интервал
	Натуральное	Кодовое		-1	0	+1	
Тепловая нагрузка на масляную пленку	q_{cp}	x_1	МВт/м ²	0,07	0,10	0,13	0,03
Эксплуатационные свойства масла	M	x_2	ранг	-1	0	+1	1
Техническое состояние дизеля	T	x_3	отн. ед.	1	2	3	1
Концентрация серы в топливе	S	x_4	%	0,3	1,0	1,7	0,7

По нашему мнению, для оценки условий работы, а следовательно, и режимов старения смазочного масла, находящегося в высокотемпературной зоне ЦПГ, необходимо использовать локальные граничные условия теплообмена, «привязанные» к цилиндровой втулке [4, 9]. Для контроля тепловой нагрузки на масляную пленку цилиндра использовали метод Эйхельберга с записью температурных колебаний поверхностных слоев цилиндровой втулки в нескольких поясах. По высоте втулки термодатчики устанавливались на расстоянии 13, 25, 50 и 75 % хода поршня от верхней мертвой точки. Для записи колебаний использовали малоинерционные датчики, поверхностные термодатчики (теплоприемники) с эффективной глубиной горячего слоя 5–20 мкм. Мгновенные тепловые потоки, действующие на втулку в разных ее поясах, определяли традиционными методами с записью температурных волн осциллографом и расшифровкой их путем измерения количества ординат температурной волны, достаточной для получения заданной точности определения тепловой нагрузки [1, 4].

Для широкомасштабного измерения мгновенных локальных потоков, действующих на масляную пленку, предложено использовать цифровой прибор [9]. Им можно измерять и регистрировать в цифровой форме дискретные значения температурной волны и при вводе в его микроЭВМ необходимых данных получать тепловые потоки. Важное достоинство прибора заключается в том, что он применительно к задаче о q_{cp} может в темпе испытаний определять мгновенные тепловые потоки на втулку, усреднять их по углу поворота коленчатого вала и высоте втулки. Прибор позволяет с учетом частоты спектра температурной волны регистрировать достаточное количество ординат температурных волн заданного числа циклов (шага дискретизации) и обрабатывать их методами мате-

матической статистики [4, 8].

Тепловая нагрузка цилиндровой втулки, а следовательно, и масляной пленки зависит от величины локального теплового потока в каждом поясе. В свою очередь, локальный тепловой поток не только определяется местом расположения рассматриваемого пояса по высоте втулки, но и зависит от фазы рабочего процесса. Поэтому при установлении средней плотности теплового потока, действующего за рабочий цикл двигателя на единицу поверхности масляной пленки, находящейся на части цилиндровой втулки, которая ометается поршнем, осреднение велось по углу поворота коленчатого вала и по высоте втулки.

Варьирование q_{cp} в интервале 0,07–1,30 МВт/м² было выбрано с целью полного охвата ДВС, выпускаемых заводом «Дальдизель». Были учтены все модификации, начиная с ДД01 и вплоть до последней модели ДД112 (двигатель с высоким наддувом) ($p_{me} = 1,7$ МПа) [10]. Среднее значение фактора q_{cp} соответствовало реальной тепловой нагрузке дизеля ДД108, что давало возможность не только осуществлять эксперимент на отсеке 1ЧН 18/22, задавая различное его форсирование, но и широко использовать полноразмерные двигатели этого предприятия на стендах и в эксплуатации на судах для подтверждения обоснованности данных по принятым функциям отклика [1, 8].

Следующим важным фактором, влияние которого рассматривалось на старение ММ, – это эксплуатационные его свойства M . Рангом «0» было закодировано наиболее распространенное на флоте судовое универсальное масло М-10Г₂ЦС (ГОСТ 12337-2020). Его можно считать типичным представителем ММ группы Г (ГОСТ 17479.1-2015). В состав этого масла входят следующие присадки: МАСК – 5,4 %; ПМС(Б) – 2,7 % и ВНИИ НП-354 – 2 %. Масло представляет собой смесь дистиллятного

и остаточного компонентов (ДС-11, ТУ 38-101-523-75) из сернистых западносибирских нефтей. Зольность его составляла 1,5 % [1, 2].

Известному и широко применяемому маслу М-10В₂ (ГОСТ 8581-2021) был присвоен ранг «-1». Оно содержит ту же углеводородную основу, что и продукт М-10Г₂ЦС. Масло включает следующую композицию присадок: 5 % ВНИИ НП-370, 2 % ПМС(Б) и 1,2 % ДФ-11. Во все рассматриваемые композиции входила противопенная присадка ПМС-200А в количестве 0,005 %. Современному маслу М-10ДЦЛ20 (ГОСТ 12337-2020) был присвоен ранг «+1». Композиция присадок, которыми оно легируется, включает: 10 % МАСК, 8 % ПМС(Б) и 2 % ВНИИ НП-354.

Фактор T , который характеризует техническое состояние двигателя, также оказывает значительное влияние на интенсивность старения масла. В эксперименте техническое состояние ДВС контролировали по угару масла. Его средние значения ($Q_y = 1, 2$ и 3 г/(кВт·ч)) за этап испытаний соответствовали принятому ранжированию рабочих зазоров в парах трения ЦПГ [8].

Анализ параметров рабочего процесса дизеля ДД112, зазоров в парах трения, износа его основных деталей определил, что при выработке ресурса между моточистками фактор T изменяется в пределах 0,8–3,2 [8]. Было принято среднее техническое состояние дизеля оценивать в зависимости от величины зазоров в ЦПГ и угара масла показателем $T = 2$, начальное – $T = 1$ и предельное – $T = 3$ [10].

Последним фактором, вызывающим интенсивное срабатывание присадок и в целом интенсивно влияющим на старение ММ, было принято содержание серы в топливе [1]. Ее концентрация находилась в диапазоне 0,3–1,7 % при среднем уровне 1 %. Это среднестатистический уровень содержания компонента в судовых дистиллятных топливах до 2020 г.

Моторный эксперимент осуществлялся на одноклиндровом отсеке 1ЧН 18/22 с параметрами: $P_{ен} = 90$ кВт, $p_{ме} = 2,1$ МПа, $n_d = 16,7$ об/с. Продолжительность этапа испытаний составляла 150 ч. Отборы проб работающего масла на анализ проводили через 25 ч [2, 11]. Дизель работал по нагрузочной характеристике. Циклы нагружения соответствовали рекомендациям [1, 8] с выдержкой средней мощности и уровня форсирования двигателя по среднему эффективному давлению с сохранением задаваемых норм тепловой нагрузки на масляную пленку программой испытаний. Долив масла для восполнения угара осуществляли при его отборе для контроля состояния и расчета скорости старения. Эксперимент проводили на дистиллятном судовом маловязком топливе СМТ (ТУ 38-101567-87).

Состояние смазочного масла исследовалось по следующим направлениям старения: срабатыванию присадок (П) (с этой целью по методике ЦНИДИ [1, 11] диализом контролировали содержание их активных компонентов); изменению щелочного (Щ) и кислотного (К) чисел (ГОСТ 11362-96); интенсивности смолообразования (С) (содержание смол определяли по результатам хроматографического анализа масел согласно рекомендациям [5, 11]); накоплению нерастворимых продуктов (концентрацию нерастворимых примесей фиксировали методом центрифугирования по ГОСТ 20684-75 бензинового раствора масла).

Перевод показателей старения a_i , определяемых в результате экспериментов, в удельные A_i осуществлялся по формуле (1) через параметры D и S моторного стенда. Эксперимент проводился с использованием некомпозиционного плана второго порядка (табл. 2), который характеризуется наличием в строках матрицы планирования большого числа нулей, что существенно упрощает вычисление коэффициентов модели. В таблице с целью сокращения объема не приведены результаты парных взаимодействий $x_i x_j$ и квадратов факторов x_i^2 , но эти данные можно получить, располагая значениями факторов в основных столбцах.

Коэффициенты уравнений регрессии были определены с помощью метода наименьших квадратов по следующим формулам [12]:

$$b_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{n=1}^{n_0=3} y_{0n}; b_i = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{N=27} x_{ij} y_j;$$

$$b_{il} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{N=27} x_{ij} x_{lj} y_j;$$

$$b_{ii} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^{N=27} x_i^2 y_j - \frac{1}{48} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{N=27} x_i^2 y_j - \frac{1}{6} \sum_{n=1}^{n_0=3} y_{0n},$$

где n_0, N – число опытов в центральной точке плана и во всех строках матрицы планирования; i, j – номер опыта в центре плана (проверка воспроизводимости) и во всей матрице планирования; y_{0n}, y_j – значение показателя функции отклика в i -м (в центре плана) и j -м опытах.

Дисперсии коэффициентов регрессии определяли по зависимостям, которые для четырехфакторного эксперимента имеют вид [1, 12]:

$$s^2\{b_0\} = \frac{1}{3} s_y^2; s^2\{b_i\} = \frac{1}{12} s_y^2; s^2\{b_{ii}\} = \frac{1}{4} s_y^2;$$

$$s^2\{b_{il}\} = \frac{3}{16} s_y^2,$$

где s_y^2 – дисперсия воспроизводимости эксперимента.

Таблица 2

Table 2

Матрица некомпозиционного плана второго порядка для построения моделей старения смазочного масла по A_i

Matrix of a second-order uncompositional plan for constructing models of lubricating oil aging according to A_i

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4
1	1	1	1	0	0	15	1	0	1	-1	0
2	1	1	-1	0	0	16	1	0	-1	1	0
3	1	-1	1	0	0	17	1	0	-1	-1	0
4	1	-1	-1	0	0	18	1	0	0	0	0
5	1	0	0	1	1	19	1	1	0	0	0
6	1	0	0	1	-1	20	1	1	0	0	0
7	1	0	0	-1	1	21	1	-1	0	0	0
8	1	0	0	-1	-1	22	1	-1	0	0	0
9	1	0	0	0	0	23	1	0	1	1	1
10	1	1	0	0	1	24	1	0	1	1	-1
11	1	1	0	0	-1	25	1	0	-1	-1	1
12	1	-1	0	0	1	26	1	0	-1	-1	-1
13	1	-1	0	0	-1	27	1	0	0	0	0
14	1	0	1	1	0	-	-	-	-	-	-

При числе степеней свободы, равном $f_1 = n_0 - 1 = 3 - 1 = 2$, и 5 %-м уровне значимости критерий Стьюдента t_τ равен 4,3. Через его значение

и величину ошибки в определении коэффициентов регрессии находили доверительные интервалы коэффициентов b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} (табл. 3).

Таблица 3

Table 3

Доверительные интервалы коэффициентов регрессии и проверка адекватности модели

Confidence intervals of regression coefficients and testing the hypothesis of the adequacy of the model

Параметр	A_{II}	A_{III}	A_K	A_C	A
$s^2\{b_0\}$	0,164	1 605	358	0,24	0,0029
$s^2\{b_i\}$	0,041	401	90	0,06	0,0007
$s^2\{b_{ij}\}$	0,123	1 204	269	0,18	0,0021
$s^2\{b_{ii}\}$	0,092	903	202	0,14	0,0016
$s\{b_0\}$	0,406	40	19	0,49	0,0534
$s\{b_i\}$	0,203	20	9	0,25	0,0267
$s\{b_{ij}\}$	0,351	35	16	0,43	0,0463
$s\{b_{ii}\}$	0,304	30	14	0,37	0,0401
$\Delta s\{b_0\}$	1,744	172	81	2,12	0,2297
$\Delta s\{b_i\}$	0,872	86	41	1,06	0,1148
$\Delta s\{b_{ij}\}$	1,510	149	70	1,84	0,1989
$\Delta s\{b_{ii}\}$	1,308	129	61	1,59	0,1723
s_E	0,987	9 632	2 150	1,46	0,0171
s_y^2	0,493	4 816	1 075	0,73	0,0086
s_R	23,1	188 437	32 964	37,7	0,42
$s_{ад}^2$	1,5	12 772	2 201	2,6	0,03
f_2	16	14	14	14	14
F_p	2,8	2,65	2,047	3,55	3,53

Здесь же для вычисления дисперсии адекватности приведены данные по степеням свободы f_2 и значениям суммы квадратов отклонения s_R эмпирических значений y_j функций отклика от их значений, вычисленных по модели во всех точках

плана. Сумма квадратов s_E в центре плана для вычисления $s_y^2(f_1 = 2)$ представлена относительно среднего значения функции отклика $\bar{y}_{0и}$.

Расчет выполнялся по формуле

Kisla G. P., Seleznyakov M. A., Kluchkov R. A., Nadezhdin A. V. Modeling and evaluation of the engine oil aging intensity in marine trunk diesel engines when they are supercharged

$$s_y^2 = \frac{s_E}{n_0 - 1} = \frac{\sum_{i=1}^3 (y_{0i} - \bar{y}_{0i})^2}{f_2}.$$

Дисперсию адекватности находили согласно выражению

$$s_{ад}^2 = \frac{s_R - s_E}{f_2}.$$

Кроме того, в табл. 3 приведены данные по расчету критерия Фишера F_p и выбора его табличного значения при степенях свободы f_1 и f_2 .

В случаях, когда коэффициенты b_{ii} и особенно b_{ii} оказывались меньше доверительного интервала, их признавали статистически незначимыми и исключали из уравнения регрессии. При совершении этой операции остальные коэффициенты пересчитывались с использованием метода наименьших квадратов. Для этого по упрощенному полиному составляли и решали систему нормальных уравнений для всех строк матрицы (см. табл. 2) планирования.

$$A_{II} = 20,6 + 6,38x_1 + 4,33x_2 + 7,85x_3 + 2,56x_4 + 5,07x_2x_3 + 2,29x_1^2 + 5,41x_3^2 + 1,49x_4^2; \quad (4)$$

$$A_{III} = 5100 + 2668x_1 + 1851x_2 + 3691x_3 + 1283x_4 + 179x_1x_2 + 2204x_2x_3 + 138x_2x_4 + 995x_1^2 + 391x_2^2 + 2600x_3^2 + 587x_4^2; \quad (5)$$

$$A_K = 2590 + 1371x_1 - 602x_2 + 1404x_3 + 721x_4 - 229x_1x_2 - 13,15x_1x_3 + 129,96x_2x_4 + 11,45x_1^2 - 3,19x_2^2 + 2,7x_3^2; \quad (6)$$

$$A_C = 70 + 4,08x_1 - 9,8x_2 + 16,82x_3 + 10,97x_4 - 8,04x_1x_2 - 13,15x_1x_3 + 129,96x_2x_4 + 11,45x_1^2 - 3,19x_2^2 + 2,7x_3^2; \quad (7)$$

$$A = 11,9 + 1,88x_1 - 0,81x_2 + 3,19x_3 + 0,35x_4 - 0,48x_1x_2 + 0,35x_2x_3 - 0,57x_2x_4 + 0,76x_1^2 - 0,27x_2^2 + 0,88x_3^2. \quad (8)$$

Модели старения ММ (4), (7) и (8) по A_{II} , A_C и A скорректированы, т. к. отдельные коэффициенты при квадратичных членах у них оказались статистически незначимыми и были исключены из первичных (исходных) уравнений регрессий, рассчитанных по данным табл. 2. Пересчет осуществлен, как уже указывалось, с использованием метода наименьших квадратов составлением и решением системы нормальных уравнений по полному полиному четырехфакторной модели [12].

Наибольшее воздействие на старение смазочного масла по всем показателям оказывает фактор T . Это видно по высоким значениям коэффициентов b_3 и b_{33} в уравнениях (4)–(8). Довольно ощутимо взаимодействие между качеством масла и содержанием серы в топливе, которое проявлено в функции A_C , когда значение коэффициента b_{24}

Так как во всех случаях расчетное значение критерия Фишера (см. табл. 3) оказалось ниже табличного $F_T = 19,4$, полученные и приведенные далее модели старения масла адекватны при 5 %-м уровне значимости экспериментальным данным. Таким образом, можно заключить, что нижеприведенные уравнения можно использовать для оценки интенсивности старения ММ в судовых дизелях в зависимости от тепловых нагрузок на масляную пленку, эксплуатационных свойств смазочного масла, технического состояния дизеля и концентрации серы в топливе.

Результаты моделирования и анализ влияния наддува двигателя на старение смазочного масла

Старение ММ по удельной интенсивности срабатывания присадок A_{II} , г/(м²·ч), расходования щелочности A_{III} , мг КОН/(м²·ч), повышения кислотности A_K , мг КОН/(м²·ч), смолообразования A_C , г/(м²·ч), и загрязнения нерастворимыми продуктами A , г/(м²·ч), адекватно аппроксимируется следующими полиномами:

превышает размеры величин, характеризующих линейные и квадратичные эффекты от действия факторов. Взаимодействие факторов также ярко выражено при срабатывании присадок, что видно из высоких значений коэффициента b_{23} в функциях отклика A_{II} и A_{III} . По другим направлениям старения ММ умеренное взаимодействие проявлено между факторами $q_{ср}$ и M , на что указывает несколько превышающее значение b_{12} над другими коэффициентами парного взаимодействия.

Анализ коэффициентов уравнений регрессий определил, что коэффициенты b_1 и b_3 имеют самые высокие значения. Величины коэффициентов взаимодействия с другими факторами, которые замыкаются на них, также повышены. Это указывает на специфичную динамику процессов старения, когда по мере роста T , а следовательно, и угара масла на

начальном этапе старения рост маслообмена опережает увеличение скорости деградации ММ по многим показателям, в результате этого состояние масла на начальных этапах его работы изменяется незначительно. При высоких T и, следовательно, большом угаре масла увеличивающийся маслообмен уже не может компенсировать отрицательное действие ухудшения технического состояния дизеля, поэтому в диапазоне $T = 2-3$ наблюдается интенсивное падение содержания в ММ присадок и его щелочности. Специфичность некоторых коэффициентов регрессии такова, когда при низком угаре масла ($T = 1$) в высокофорсированных дизелях ($x_1 > 0$) интенсивность смолообразования столь высока, что содержание смол в масле превышает 10 % и это вызывает усиленное лакообразование на юбке поршня и забивание дренажных отверстий маслосъемных колец отложениями.

Высокий эффект взаимодействия факторов MT ($b_{23} = 5,07$) во влиянии на A_{II} приводит при $T = 1,5-2,5$ к снижению скорости срабатывания присадок, особенно ВНИИП-370, содержащейся в масле М-10В₂. Этот факт объясняется спецификой маслообмена и низкой концентрацией присадок в товарном масле группы В₂. Это же явление наблюдается при идентификации срабатывания присадок по щелочности A_{III} ($b_{23} = 2\ 204$). Самые низкие значения скорости срабатывания щелочности $4 \cdot 10^3$ мг КОН/(м²·ч) наблюдается у масла М-10В₂ при $T = 1,3-2,2$. Таким образом, зафиксирован экстремальный характер зависимости по A_{II} и A_{III} для масла низкой моторной группы, который обусловлен высокими значениями коэффициентов b_{23} и b_{33} . Аналогично вышеизложенному из-за высоких отрицательных значений коэффициента b_{24} наблюдается резкое повышение значений A_C в диапазоне $T = 2-3$ для всех масел.

Учитывая однонаправленность роста показателей старения ММ по разным направлениям, предложено представить зависимость $A_i(x_i)$ в обобщенном виде в виде линий постоянного уровня в четырехмерном факторном пространстве. Графическая зависимость (рис. 1) приведена для соотношения $(x_2 + x_1) + (x_4 + x_3) = 0$. При такой композиции минимальное значение рассматриваемых попарно (A_{III} и A), (A_K и A_C), представленных функцией отклика, будет находиться в верхнем правом углу квадратов. Это же явление при аналогичном варьировании параметрами q_{cp} и M , но в более узкой области, наблюдается и по функции отклика A_C .

Анализ зависимости $A_i(x_i)$ на рис. 1, а и б показывает некоторую стабилизацию параметра старения A_{III} в области $S < 1\%$ и $T > 2$ по мере снижения форсировки дизеля q_{cp} и увеличения моторной группы M масла. При сопоставлении линий x_4-x_3

действие фактора T на старение масла по показателю A также преобладает над влиянием S . Схема роста функции отклика A и A_C при взаимодействии этих же факторов в четырехзвенной системе проходит в том же направлении, что и по A_{III} и A , но несколько в другом масштабе. Стабилизация в направлении старения по A_{III} и A_C при противоположном совместном горизонтальном смещении значений факторов x_1 и x_2 наблюдается. По показателям A и A_K при совместном движении в сторону снижения q_{cp} и увеличения M ее нет.

Анализ линий постоянного уровня в четырехмерном пространстве указывает на наличие участков, для которых характерно постоянство функции отклика из-за противоположного равноценного действия на нее факторов q_{cp} и M при их разной направленности. Так, например, при смещении позиции $M > 0$ в сочетании x_1-x_2 для области $S < 1\%$ и $T > 2$ характерно постоянство показателя A_{III} . Здесь линии зависимостей $A_{III}(x_1, x_2)$ почти горизонтальные (рис. 1, а). Подобное явление характерно и для показателя A_C (рис. 1, б), но оно выражено на более коротком участке разных сочетаний факторов q_{cp} и M .

В области $S = 1-1,35\%$ и $T = 1-2$ наблюдается рост показателей A_{III} и A_C по мере повышения q_{cp} и снижения величины M , характеризующей эксплуатационные свойства масла. Здесь форсировка двигателя превалирует по отношению к показателю качества ММ в действии на рассматриваемые функции отклика. Подобное явление присуще также направлениям старения масла по A и A_C , когда экспоненциальные зависимости по ним указывают на преобладающее влияние q_{cp} над M и T по сравнению с действием M во всем факторном пространстве.

Зависимости (4)–(8) могут быть использованы для определения срока службы ММ в форсированных ДВС по браковочным показателям. Модели адекватны и за пределами факторного пространства. Расхождение расчетных с экспериментальными данными не превышает 12 % при использовании низкосернистых топлив с содержанием серы 0,1–0,5 % согласно требованиям конвенции «МАРПОЛ 73/78». Обобщение экспериментальных данных [1, 8] позволило предложить следующие регрессионные уравнения, по которым можно задать в зависимости от q_{cp} и S значение концентрации $П_{бр}$ находящихся в активной форме многофункциональных присадок в работающем масле и величину его остаточной щелочности $Щ_{бр}$ при потере основных функциональных характеристик:

$$П_{бр} = 0,5 - 12q_{cp} + 170q_{cp}^2; \quad (9)$$

Кича Г. П., Серебряков М. А., Крючков Р. А., Надежкин А. В. Моделирование и оценка интенсивности старения моторного масла в судовых тронковых дизелях при их наддуве

$$\Pi_{бр} = 0,8 - 24q_{cp} + 0,7S + 4q_{cp}S + 170q_{cp}^2 + 0,05S^2. (10)$$

Выражения (9) и (10) через тепловую нагрузку в цилиндре и содержание серы в топливе показателями $\Pi_{бр}$ и $\Pi_{бр}$ учитывают допустимое уменьшение моюще-диспергирующих и нейтрализующих свойств унифицированных ММ на основе приса-

док ПМС(Б) и МАСК, при которых еще возможно ресурсосберегающее маслоиспользование. Эксплуатация судовых форсированных дизелей при параметрах масла ниже указанных может привести к интенсификации нагаро-лакообразования в ЦПГ и коррозионному изнашиванию основных деталей.

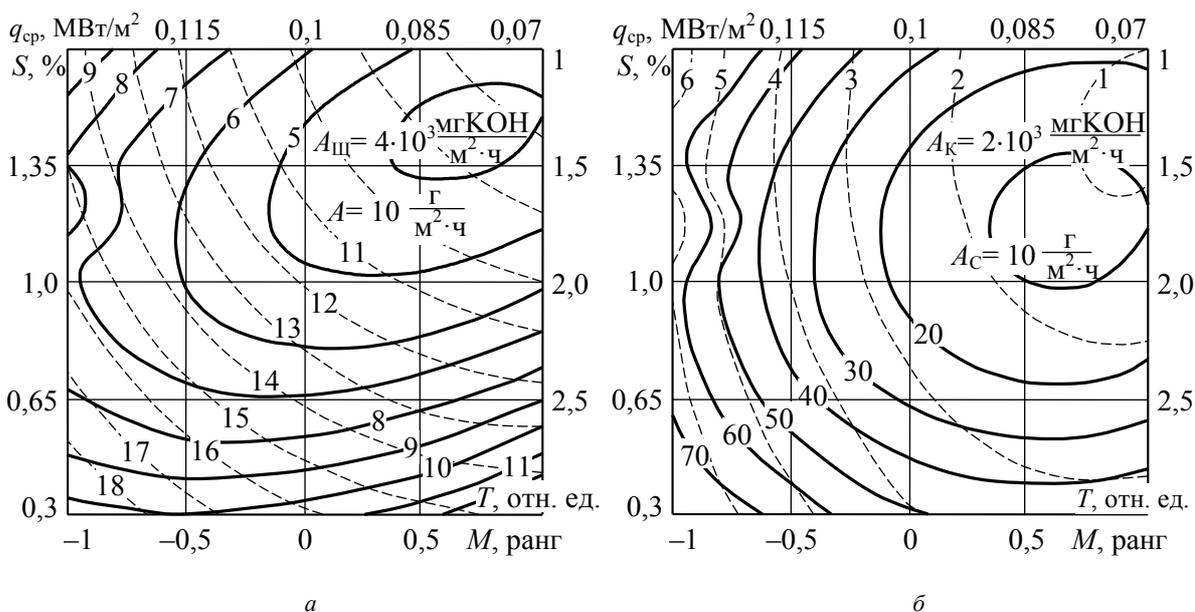


Рис. 1. Линии равных значений гиперповерхностей функций отклика по удельной интенсивности срабатывания щелочности $A_{щ}$ и образования нерастворимых продуктов A (а), смолообразования A_c и роста кислотности A_k (б)

Fig. 1. Lines of equal values of hypersurfaces of response functions for the specific intensity of activation of alkalinity $A_{щ}$ and the formation of insoluble products A (а), resin formation A_c and acidity growth A_k (б)

Достоинство разработанных моделей старения ММ в форсированных дизелях состоит в возможности рассчитать по зависимостям (4)–(8) скорости этих процессов и подобрать смазочные масла, удовлетворяющие требованиям форсировки двигателя и качества применяемого топлива для условий долгороботающего маслоиспользования, т. е. функционирования без смены ММ. Повышение и увеличение содержания серы в топливе ужесточает условия работы смазочного масла в ДВС. Поэтому с повышением среднего эффективного давления p_{me} и, следовательно, тепловой нагрузки на масляную пленку цилиндра двигателя возникает необходимость в увеличении термоокислительной стабильности масла, а в случае применения остаточных высоковязких топлив – его моюще-диспергирующих и нейтрализующих свойств.

По значениям браковочных показателей (формулы (9) и (10)) с использованием основного кинетического уравнения (2) старения ММ [2, 6] можно

рассчитать параметры смазочного масла, соответствующие требованиям эффективного функционирования комплекса ДТМ. В качестве примера рационального подбора звеньев рассматриваемого комплекса, располагая связью p_{me} и q_{cp} [6], предложим следующие их ресурсосберегающие сочетания (рис. 2).

Масло М-10В₂, содержащее 3 %-ю концентрацию в активной форме многофункциональных присадок, в зависимости от технического состояния двигателя способно обеспечивать его надежную работу при форсировке $p_{me} = 0,7–1,2$ МПа (рис. 2, а). Унифицированное масло М-10Г₂ЦС может эффективно использоваться в дизеле, форсированном по p_{me} до 1,8 МПа. При этом из-за более эффективной композиции присадок и повышенной их концентрации в активной форме (4,5 % в свежем товарном масле) нагарообразование не приводит к закоксовыванию поршневых колец, поэтому компрессия в рабочих цилиндрах сохра-

няется в течение всего срока гарантийной работы двигателя до переборки цилиндров.

Возможности унифицированных ММ по нейтрализующим свойствам (рис. 2, б), рассчитанные по полученным зависимостям, показывают удовлетворительную работу масла М-10В₂ в двига-

теле с форсировкой по p_{me} до 1 МПа только при работе на малосернистом топливе ($S = 0,3 \%$). Масло М-10Г₂ЦС с начальной щелочностью $\Pi_0 = 9,2$ мг КОН/г обеспечивает при содержании серы в топливе 1 % эффективную работу дизеля с форсировкой до 1,8 МПа.

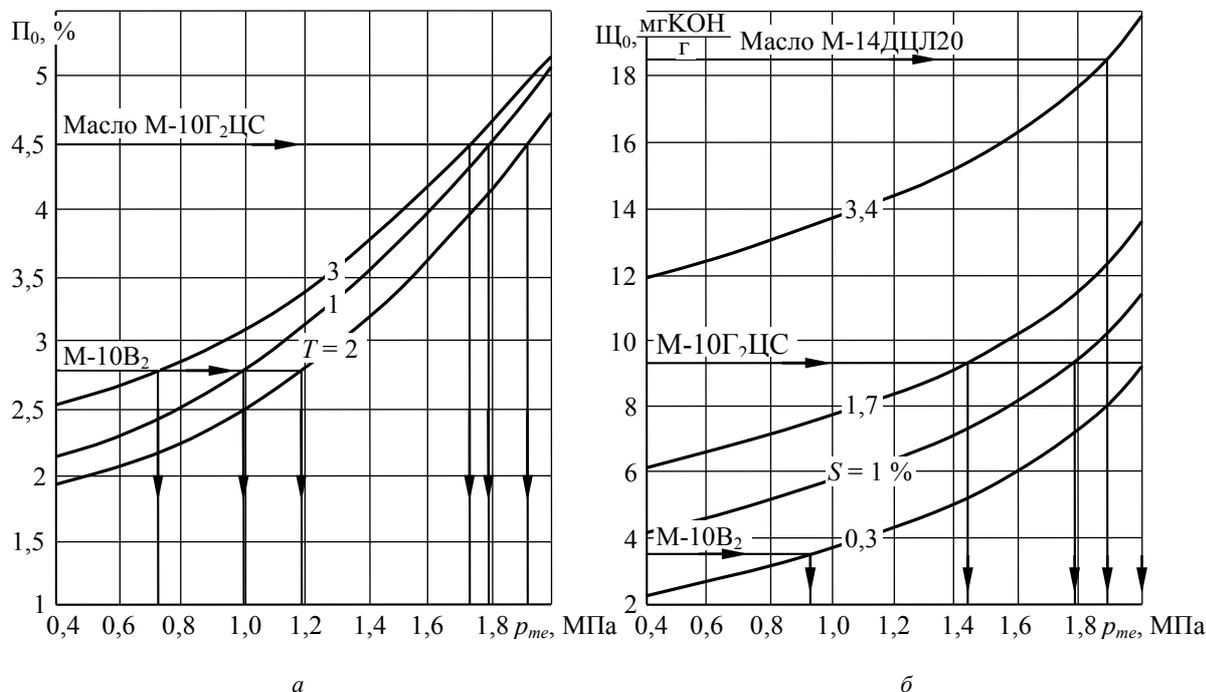


Рис. 2. Требования к качеству моторного масла по моюще-диспергирующим (а) и нейтрализующим (б) свойствам в зависимости от форсировки дизеля

Fig. 2. Requirements for the quality of engine oil in terms of detergent-dispersant (a) and neutralizing (b) properties, depending on the boost of the diesel engine diesel

Сжигание высокосернистого топлива ($S = 1,7 \%$) в этом случае допустимо в дизеле с форсировкой не более 1,5 МПа. Тяжелые высоковязкие топлива, имеющие концентрацию серы 3,4 %, возможно использовать только при работе дизеля на масле М-14ДЦЛ20. При этом уровень их форсировки на номинальном режиме работы не должен превышать 2 МПа. При той же и более высокой форсировке дизеля, как проиллюстрировали расчеты по формулам (4)–(8), возникает необходимость использования масла с более высоким уровнем начальной щелочности, превышающей 30 мг КОН/г. Применение топлив, содержащих серы более 0,5 %, требует оснащать дизельные установки скрубберами, что обусловлено необходимостью снижения выбросов в атмосферу продуктов, содержащих серу.

Выводы

1. Результаты исследования основных направлений старения ММ в судовом дизеле подтвердили

их интенсификацию с увеличением наддува, что связано с ростом термоокислительного действия продуктов сгорания ДВС на пленку смазки, находящуюся и обновляющуюся на втулках цилиндров. Вторым по интенсивности воздействия на окислительные и деграционные процессы в масле является техническое состояние дизеля. Изменение зазоров в сопряжениях деталей ЦПГ способствует росту угара и маслообмена в двигателе. При этом на начальном этапе роста T и Q_y увеличивающийся маслообмен способствует стабилизации параметров старения ММ, т. к. скорости его деградации по основным направлениям повышаются медленнее увеличения угара и, следовательно, маслообмена.

2. Расчетно-экспериментальное моделирование старения ММ с идентификацией главных действующих на него факторов q_{cp} и T определило:

– интенсивное смолообразование смазочного масла, особенно при низком его угаре (малом значении T) и высокой ($q_{cp} > 0,1$ МВт/м²) тепловой

нагрузке дизеля;

– более высокую (в 1,5–2 раза) деградацию ММ по основным направлениям при увеличенном наддуве ($p_{me} > 1,2$ МПа) по сравнению с его старением при эксплуатации форсированных ($p_{me} = 0,8–1,0$ МПа) двигателей действующего парка;

– образование в больших количествах кислых продуктов старения при применении высокосернистых топлив и масла с низкими значениями моторной группы М.

3. Проведенный на базе полученных моделей анализ скорости старения ММ в современных су-

довых тронковых дизелях со средним и высоким наддувом подтвердил целесообразность применения в них унифицированных масел типа М-10(14)Г₂ЦС и М-14(16)ДЦЛ20 с многофункциональными присадками МАСК и ПМС при сжигании дистиллятных топлив и их смесей с мазутами, содержащих серы до 0,5 %. При использовании тяжелых высоковязких остаточных топлив с более высоким содержанием серы концентрация многофункциональных присадок в ММ должна соответствовать уровню легирования ими смазочных масел М-14(16)ДЦЛ20 и М-14(16)ДЦЛ30.

Список источников

1. Кича Г. П., Перминов Б. Н., Надежкин А. В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях: моногр. Владивосток: Изд-во Мор. гос. ун-та, 2011. 372 с.
2. Цветков О. Н., Максимов А. Л. Современность и перспективы разработки и применения моторных масел для дизелей // Двигателестроение. 2020. № 4 (282). С. 25–34.
3. Кича Г. П. Влияние очистки масел на их расход в дизельных двигателях // Химия и технология топлив и масел. 1986. № 8. С. 22–24.
4. Мохнаткин Э. М. Теоретические и экспериментальные исследования температурных условий окисления масла в цилиндре дизеля // Тр. Центр. науч.-исслед. дизел. ин-та. 1970. Вып. 60. С. 155–159.
5. Кича Г. П. Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания // Химия и технология топлив и масел. 1986. № 2. С. 28–30.
6. Тарасов М. И., Кича Г. П. Кинетика старения моторного масла в судовых дизелях при непрерывном и периодическом его доливе для компенсации угара // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2023. № 1. С. 7–14.
7. Кича Г. П., Тарасов В. В., Деревцов Е. М. Эффек-

тивность применения в судовых дизелях регенерированных восстановленных отработанных моторных масел // Науч. проблемы трансп. Сибири и Дальнего Востока. 2016. № 1-2. С. 83–91.

8. Тарасов М. И., Кича Г. П., Надежкин А. В. Влияние угара смазочного масла на интенсивность его старения в судовом тронковом дизеле // Мор. интеллектуал. технологии. 2021. № 4 (54). Т. 3. С. 56–65.

9. Пойда А. Н., Смолин Ю. А. Цифровой прибор для измерения мгновенных локальных тепловых потоков в дизелях // Двигателестроение. 1983. № 3. С. 25–26.

10. Кича Г. П., Надежкин А. В., Пак Н. К. Саморегулирующийся фильтр новой конструкции для очистки топлив и смазочных масел на судах // Науч. проблемы трансп. Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 1. С. 203–207.

11. Никифоров О. А., Данилова Е. В. Рациональное использование моторных масел в судовых дизелях. Л.: Судостроение, 1986. 96 с.

12. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.

References

1. Kicha G. P., Perminov B. N., Nadezhkin A. V. *Resursosberegaiushchee masloispol'zovanie v sudovykh dizeliakh: monografiia* [Resource-saving oil use in marine diesel engines: monograph]. Vladivostok, Izd-vo Morskogo gosudarstvennogo universiteta, 2011. 372 p.
2. Tsvetkov O. N., Maksimov A. L. *Sovremennost' i perspektivy razrabotki i primeneniia motornykh masel dlia dizelei* [Modernity and prospects for the development and application of engine oils for diesel engines]. *Dvigatellestroenie*, 2020, no. 4 (282), pp. 25-34.
3. Kicha G. P. *Vliianie ochistki masel na ikh raskhod v dizel'nykh dvigateliakh* [The effect of oil purification on their consumption in diesel engines]. *Khimiia i tekhnologiia topliv i masel*, 1986, no. 8, pp. 22-24.
4. Moxnatkin E. M. *Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniia temperaturnykh uslovii okisleniia masla v tsilindre dizelia* [Theoretical and experimental studies of the temperature conditions of oil oxidation in a diesel cylinder]. *Trudy Tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo dizel'nogo instituta*, 1970, iss. 60, pp. 155-159.
5. Kicha G. P. *Ochistka masla v dvigateliakh vnutrennego sgoraniia* [Oil purification in internal combustion engines].

Khimiia i tekhnologiia topliv i masel, 1986, no. 2, pp. 28-30.

6. Tarasov M. I., Kicha G. P. *Kinetika starenii motor-nogo masla v sudovykh dizeliakh pri nepreryvnom i periodicheskom ego dolive dlia kompensatsii ugara* [Kinetics of engine oil aging in marine diesels with continuous and periodic refilling to compensate for carbon monoxide]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Serii: Morskaia tekhnika i tekhnologiia*, 2023, no. 1, pp. 7-14.

7. Kicha G. P., Tarasov V. V., Derevtsov E. M. *Effektivnost' primeneniia v sudovykh dizeliakh regenerirovannykh vosstanovlennykh otrabotannykh motornykh masel* [The effectiveness of the use of regenerated recovered used engine oils in marine diesels]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2016, no. 1-2, pp. 83-91.

8. Tarasov M. I., Kicha G. P., Nadezhkin A. V. *Vliianie ugara smazochnogo masla na intensivnost' ego starenii v sudovom tronkovom dizele* [The effect of lubricating oil fumes on the intensity of its aging in a marine tank diesel engine]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2021, no. 4 (54), vol. 3, pp. 56-65.

9. Poida A. N., Smolin Iu. A. *Tsifrovoyi pribor dlia iz-*

mereniia mgnovennykh lokal'nykh teplovykh potokov v dizeliakh [Digital device for measuring instantaneous local heat fluxes in diesel engines]. *Dvigatelsestroenie*, 1983, no. 3, pp. 25-26.

10. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Pak N. K. Samo-regeneriruiushchiisia fil'tr novoi konstruktсии dlia ochistki topliv i smazochnykh masel na sudakh [Self-regenerating filter of a new design for cleaning fuels and lubricating oils on ships]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego*

Vostoka, 2013, no. 1, pp. 203-207.

11. Nikiforov O. A., Danilova E. V. *Ratsional'noe ispol'zovanie motornykh masel v sudovykh dizeliakh* [Rational use of motor oils in marine diesel engines]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1986. 96 p.

12. Spiridonov A. A. *Planirovanie eksperimenta pri isledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p.

Статья поступила в редакцию 26.11.2023; одобрена после рецензирования 02.02.2024; принята к публикации 08.02.2024
The article was submitted 26.11.2023; approved after reviewing 02.02.2024; accepted for publication 08.02.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Геннадий Петрович Кича – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; Kicha@msun.ru

Gennadiy P. Kicha – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Marine Internal Combustion Engines; Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy; Kicha@msun.ru

Максим Анатольевич Серебряков – аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; goryn76@yandex.ru

Maksim A. Serebryakov – Postgraduate Student of the Department of Marine Internal Combustion Engines; Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy; goryn76@yandex.ru

Руслан Алексеевич Крючков – аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; kryuchkovra@mail.ru

Ruslan A. Kriuchkov – Postgraduate Student of the Department of Marine Internal Combustion Engines; Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy; kryuchkovra@mail.ru

Андрей Вениаминович Надежкин – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; nadezkin@msun.ru

Andrey V. Nadezhkin – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Marine Internal Combustion Engines; Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy; nadezkin@msun.ru

