

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО МОТОРНОГО МАСЛА НА ИЗНАШИВАНИЕ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ ЕГО РАБОТЕ НА РАЗНЫХ СОРТАХ ТОПЛИВА

В. В. Тарасов, А. Н. Соболенко

*Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского
Владивосток, Российская Федерация*

Проведено исследование эксплуатационных свойств регенерированных моторных масел в аспекте влияния на износ трибоузлов тронкового дизеля при его работе на разном по качеству судовом топливе. Построены обобщенные модели изнашивания деталей судового дизеля на основании экспериментальных исследований. Для экспериментов был использован дизель 2Ч10,5/13. Износ определялся методом искусственных баз и взвешиванием. Рассмотрены четыре группы (в зависимости от показателя качества) основных показателей применяемых на судах топлив. К первой группе отнесены дистиллятные топлива и судовое маловязкое топливо, близкое по своим показателям к зарубежным топливам. Во вторую группу входят моторное топливо, флотские мазуты и экспортные топлива (средневязкие топлива). Третью группу составляет судовое высоковязкое топливо; четвертую группу – топлива, изготовленные из остатков нефтепереработки. Описание обобщенной модели изнашивания деталей испытываемого дизеля было осуществлено полиномом второго порядка. Для получения модели был выбран некомпозиционный план при трёх испытываемых переменных: концентрация присадок в масле, фактор качества топлива и уровень форсирования дизеля. Получена обобщенная модель изнашивания дизеля в виде полинома второго порядка. Проиллюстрировано наложение гиперповерхностей отклика функций износа двигателя внутреннего сгорания при факторах форсирования дизеля на нулевом, нижнем и на верхнем уровне с визуализацией влияния на параметры износа двигателя в зависимости от содержания присадок и качества применяемого топлива при испытаниях регенерированного моторного масла. Проверка адекватности модели подтвердила, что модель адекватна для машин со средним эффективным давлением и широким спектром качества применяемого топлива. Представлена возможность использования полученной модели для оценки величины износа при разных значениях параметрических факторов.

Ключевые слова: регенерированное моторное масло, модель изнашивания, концентрация присадок, качество топлива, уровень форсирования, дизель.

Для цитирования: Тарасов В. В., Соболенко А. Н. Влияние эксплуатационных свойств регенерированного моторного масла на изнашивание судового дизеля при его работе на разных сортах топлива // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 4. С. 71–81. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-71-81.

Введение

Повышение экономичности судовых дизелей путём повторного использования отработанного моторного масла, после его регенерации и восстановлении базовых эксплуатационных свойств моторной группы, является важной составной частью решения проблемы снижения загрязнения окружающей среды и экономии моторных масел на морском транспорте [1–4]. Большой интерес представляет изучение влияния степени форсирования дизеля и качества топлива на износ узлов дизеля при использовании регенерированного моторного масла (РММ).

Настоящее исследование посвящено разработке модели износа деталей двигателя на основе испытаний дизеля на РММ в зависимости от уровня его форсирования, качества топлива и концентрации присадок.

Методика проведения исследований и постановка задачи оценки эксплуатационных свойств регенерированного моторного масла индикацией износа

Оценку противоизносных свойств РММ марки М-10-В₂(р) осуществляли на дизеле марки 2Ч10,5/13 в режиме номинальной мощности ($N_e = 14,7$ кВт, $n = 1\ 500$ мин⁻¹) за периоды нара-

ботки по 100 ч. Замер величины износа (И) контролируемых деталей испытываемого дизеля осуществляли посредством взвешивания по потере их массы за период испытаний, а для некоторых деталей – с помощью метода искусственных баз. Для этого использовался прибор УПОИ-6. Оценку величины износа осуществляли для втулок цилиндров, поршневых колец, вкладышей подшипников и шатунных шеек коленчатого вала. Для увеличения загрязнённости масла с целью повышения скорости изнашивания деталей дизеля вместо штатного полнопоточного фильтра тонкой очистки был поставлен фильтр грубой очистки [5].

Для анализа использовалась обобщенная модель изнашивания деталей испытываемого дизеля, полученная в виде полинома второго порядка [6]. Модель величины изнашивания при предоставлении факторов в натуральном выражении имеет вид [1]:

$$I = -101,41 - 1,76c_n + 81,44K_T + 119,6p_{me} - 11,25c_n K_T - 3,37c_n p_{me} + 34,25p_{me} K_T + 0,63c_n^2 + 132,03K_T^2, \quad (1)$$

где c_n – содержание присадок, мг КОН/г; K_T – качество топлива, относ. единица; p_{me} – форсирование дизеля, МПа.

Анализ зависимости (1) свидетельствует, что наиболее значимым для износа является фактор качества топлива K_T . Действие фактора содержания присадок c_n на величину износа дизеля в наибольшей степени проявляется при взаимодействии с фактором K_T . Если совместное влияние факторов K_T и p_{me} приводит к увеличению износа И, то совместное влияние факторов c_n и K_T приводит к его снижению.

Эффект взаимодействия факторов c_n и K_T выражен сильно, а совместное действие фактора c_n или фактора K_T с фактором p_{me} проявляется слабо.

Полученная математическая модель рекомендована для расчётов при исследовании эффективности использования РММ в дизелях разной степени форсирования.

Исследование влияния качества судовых топлив на износ дизеля при его работе на регенерированном моторном масле с добавлением присадок

Анализ основных показателей применяемых на судах топлив доказал, что они могут быть разбиты на 4 группы в зависимости от показателя качества K_T .

В *первую группу*, со значениями $K_T = 0,2 \div 0,5$, в основном входят дистиллятные топлива Л, З, ЗС, А и УФС (ГОСТ 305-2010) с содержанием серы от 0,2 до 0,5 %. Топливо УФС от остальных отличается более тяжёлым фракционным составом.

В эту же группу входит судовое маловязкое топливо СМТ (ТУ 38.101.567-97), которое по своим показателям близко к зарубежным топливам DM, DMA и DMB (ISO 8217-96). Его получают смешиванием вторичных крекинг-процессов с дизельными фракциями с повышенными температурами кипения. Компонентами СМТ являются негидроочищенные прямгонные атмосферные и вакуумные дистиллятные продукты вторичного происхождения – лёгкие и тяжёлые газойли каталитического и термического крекинга, коксования. Содержание серы обычно находится в диапазоне 0,5÷1 % и может достигать до 1,5 %.

Ко *второй группе* ($K_T = 0,6 \div 0,9$) относятся моторное топливо ДТ (1667-2010), флотские мазуты Ф-5 и Ф-12 (ГОСТ 10585-99) и экспортные топлива Э-2 и Э-3 (ТУ 38.001361-97). Содержание серы в них колеблется в диапазоне 0,5÷2 %. Моторное топливо и флотские мазуты получают смешиванием продуктов прямой перегонки нефти с дизельным топливом. Входящие в эту же группу судовые средневязкие топлива СЛ (ТУ 38.101314-95) получают компаундированием остатков перегонки и деструктивных процессов с добавлением дистиллятных фракций средней вязкости. Содержание серы в них колеблется в пределах 0,5÷1 %. Вязкость составляет 4÷5 °ВУ при 50 °С. Из зарубежных топлив во вторую группу можно включить судовые топлива DMC, RMA, RMB, RMC со сравнительно высоким содержанием серы, иногда превышающим 2 %. Их характеристики полностью соответствуют международному стандарту на судовые топлива MSISO/DIS-F-8217.

Третья группа ($K_T = 1 \div 1,3$) представлена судовым высоковязким топливом СВЛ (ТУ 38.1011314-90). Оно содержит 1÷2,5 % серы. Типичными представителями этой группы являются российское экспортное топливо Э-4 (ТУ 38.001211-97) и зарубежный высоковязкий мазут RDM (ISOBS 8217-96). Зарубежные топлива характеризуются повышенным содержанием серы, которое может достигать до 3,5 %.

Четвёртая группа ($K_T = 1,4 \div 1,8$) представлена топливами с вязкостью $80 \div 180$ сСт при 50°C . К ним относятся следующие топлива: моторное ДМ (ГОСТ 1667-2010), высоковязкое топливо СВТ (ТУ 38.1011314-90), экспортное топливо Э-5 (ТУ 38.001361-92) и топочный мазут М-40В (ГОСТ 10585-99). Эти топлива изготавливают из остатков нефтепереработки. Для снижения температуры застывания в некоторые из них добавляют среднестиллятные фракции. Содержание серы в них находится в диапазоне $2 \div 3\%$. Зарубежными аналогами перечисленных топлив могут выступать топлива RME и RMF (ISOBF-96) с содержанием серы $3,5 \div 4\%$.

Исследование эффективности регенерированного моторного масла в дизелях с использованием представленной регрессионной модели при граничных значениях уровня форсирования дизеля

Эффективность РММ в дизеле с нулевым уровнем его форсирования $p_{me} = 0$.

Математическая модель для расчёта величины износа при применении РММ при факторе форсирования, взятом на нулевом уровне ($p_{me} = 1,0$ МПа) имеет вид:

$$И = 18,19 - 5,13c_n + 0,63c_n^2 + 115,69K_T + 132,03K_T^2 - 11,25c_nK_T.$$

Геометрическая интерпретация полученной регрессионной модели величины износа трибосопряжений дизеля в натуральных значениях при факторе форсирования, взятом на нулевом уровне ($p_{me} = 1,0$ МПа), приведена на рис. 1 и 2, а двумерное сечение с линией постоянного уровня износа – на рис. 3.

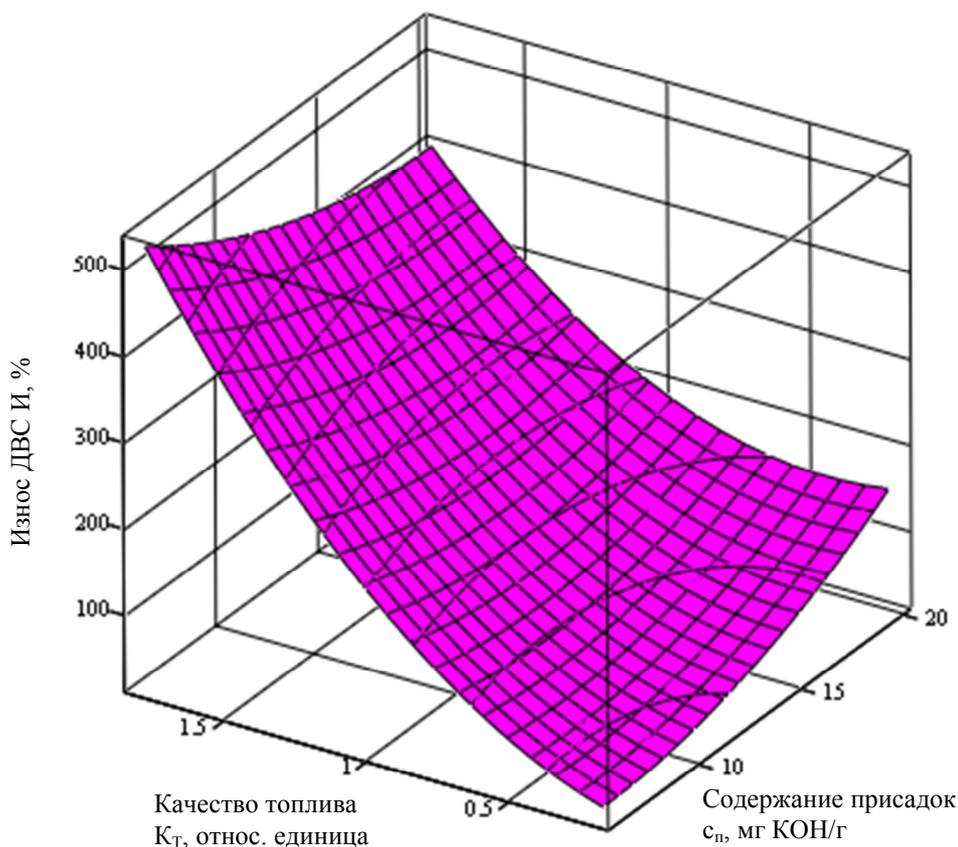


Рис. 1. Гиперповерхность отклика функции износа двигателя внутреннего сгорания (ДВС) при факторе форсирования дизеля на нулевом уровне $p_{me} = 1,0$ МПа в зависимости от содержания присадок c_n и качества применяемого топлива K_T при испытаниях РММ

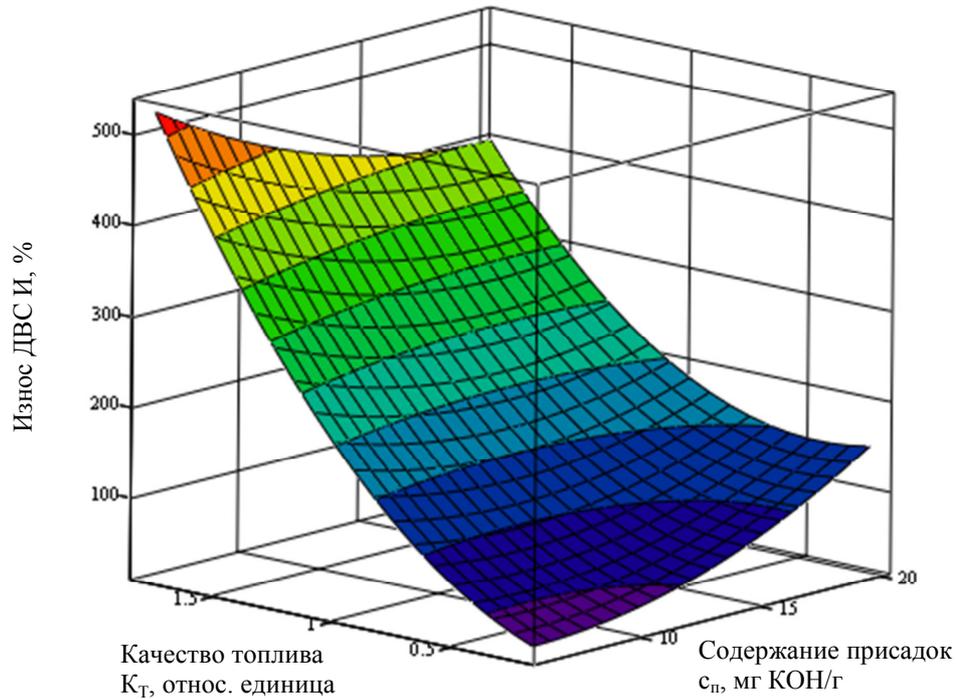


Рис. 2. Гиперповерхность отклика функции износа ДВС с визуализацией его параметров при факторе форсирования дизеля на нулевом уровне $p_{me} = 1,0$ МПа в зависимости от содержания присадок c_n и качества применяемого топлива K_T при испытаниях РММ

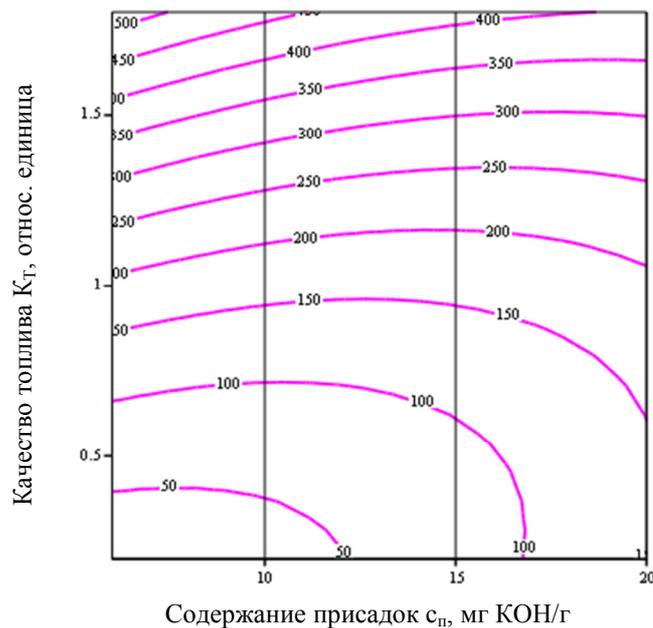


Рис. 3. Двумерные сечения отклика с линией одного уровня функции износа ДВС при факторе форсирования дизеля на нулевом уровне $p_{me} = 1,0$ МПа в зависимости от содержания присадок c_n и качества применяемого топлива K_T при испытаниях РММ

Эффективность РММ в дизеле с нижним уровнем его форсирования $p_{me} = -1$.

Математическая модель при факторе форсирования, взятом на нижнем уровне ($p_{me} = 0,5$ МПа) имеет вид для эффективности применения РММ:

$$И = 18,552 - 3,445c_n + 0,63c_n^2 + 98,565K_T + 132,03K_T^2 - 11,25c_nK_T.$$

Геометрическая интерпретация полученной регрессионной модели износа трибосопряжений дизеля в натуральных значениях при факторе форсирования, взятом на нижнем уровне ($p_{me} = 0,5$ МПа), приведена на рис. 4 и рис. 5, а двумерное сечение с линией постоянного уровня износа – на рис. 6.

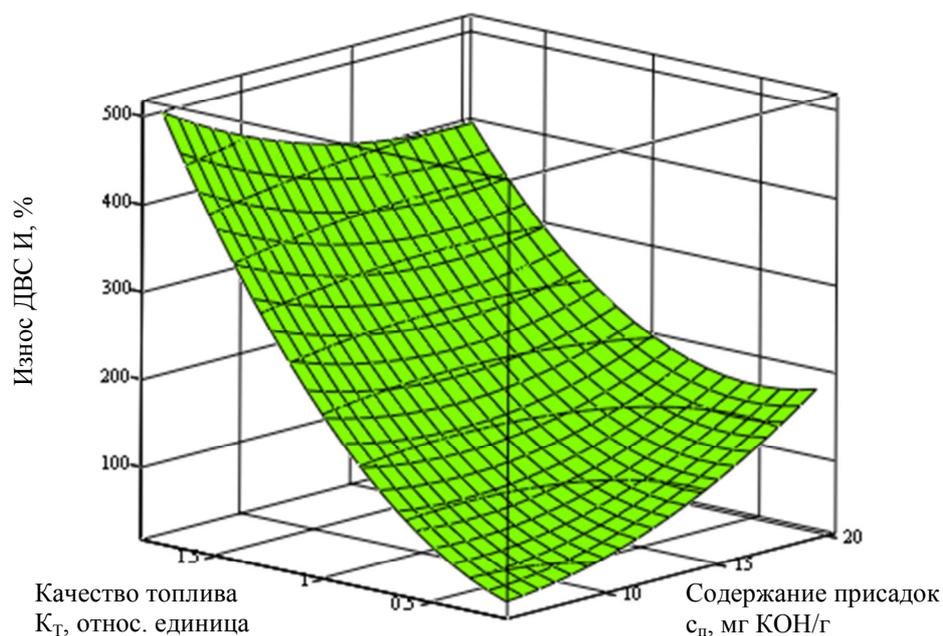


Рис. 4. Гиперповерхность отклика функции износа ДВС при факторе форсирования дизеля на нижнем уровне $p_{me} = 0,5$ МПа в зависимости от содержания присадок $c_{п}$ и качества применяемого топлива K_T при испытаниях РММ

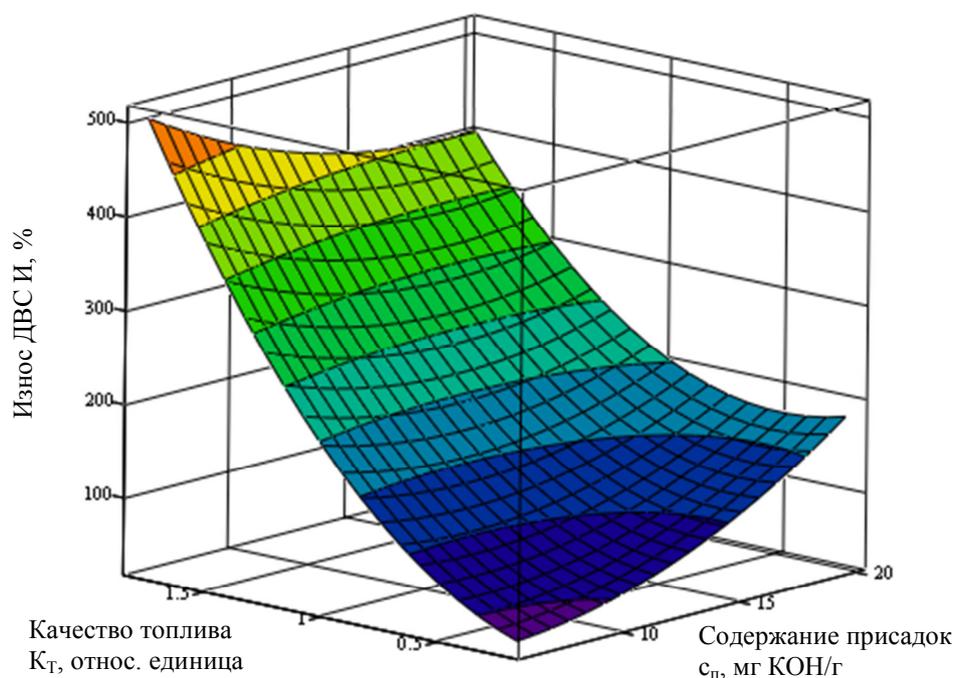


Рис. 5. Гиперповерхность отклика функции износа ДВС с визуализацией его параметров при факторе форсирования дизеля на нижнем уровне $p_{me} = 0,5$ МПа в зависимости от содержания присадок $c_{п}$ и качества применяемого топлива K_T при испытаниях РММ

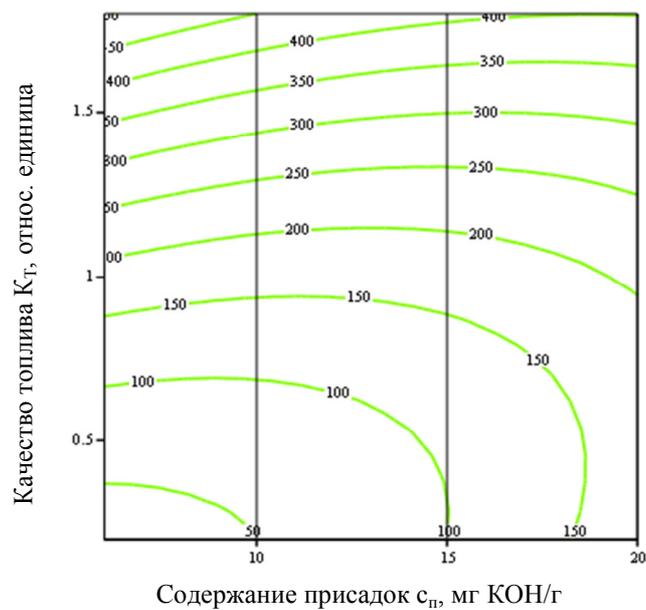


Рис. 6. Двумерные сечения отклика с линией одного уровня функции износа ДВС при факторе форсирования дизеля на нижнем уровне $p_{me} = 0,5$ МПа в зависимости от содержания присадок c_n и качества применяемого топлива K_T при испытаниях РММ

На рис. 1, 2, 4 и 5 приведено наложение поверхностей отклика износа трибосопряжений ДВС, характеризующих эффективность РММ, применяемого в дизелях с разным уровнем форсирования мощности. Совмещенные поверхности отклика, характеризующие процесс изнашивания поверхностей трибосопряжений ДВС разной степени форсирования представлены на рис. 7 (обозначены как поверхность 1 и поверхность 2).

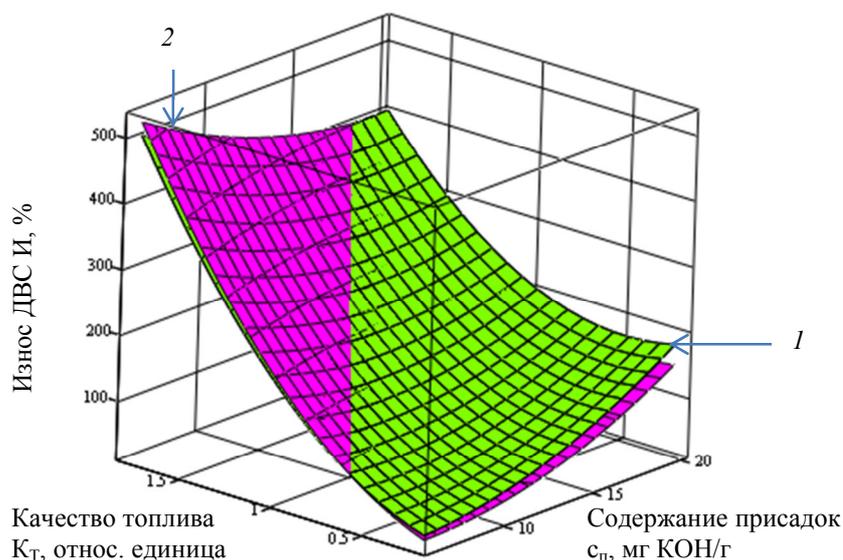


Рис. 7. Наложение гиперповерхностей отклика функций износа ДВС при факторах: форсирование дизеля на нулевом уровне $p_{me} = 1,0$ МПа и форсирование дизеля на нижнем уровне $p_{me} = 0,5$ МПа с визуализацией её влияния на параметры износа ДВС в зависимости от содержания присадок c_n и качества применяемого топлива K_T при испытаниях РММ: 1 – гиперповерхность отклика функции износа ДВС при факторе форсирования дизеля на нулевом уровне $p_{me} = 1,0$ МПа; 2 – гиперповерхность отклика функции износа ДВС при факторе форсирования дизеля на нижнем уровне $p_{me} = 0,5$ МПа

Эффективность РММ в дизеле с верхним уровнем его форсирования $p_{me} = +1$.

Математическая модель величины износа при факторе форсирования, взятом на верхнем уровне ($p_{me} = 1,5$ МПа), для применения РММ имеет вид:

$$И = 77,99 - 6,815c_{п} + 0,63c_{п}^2 + 132,815K_{T} + 132,03K_{T}^2 - 11,25c_{п}K_{T}.$$

Геометрическая интерпретация полученной регрессионной модели износа трибосопряжений дизеля в натуральных значениях при факторе форсирования, взятом на верхнем уровне ($p_{me} = 1,5$ МПа), приведена на рис. 8 и 9, а двумерное сечение с линией постоянного уровня износа – на рис. 10.

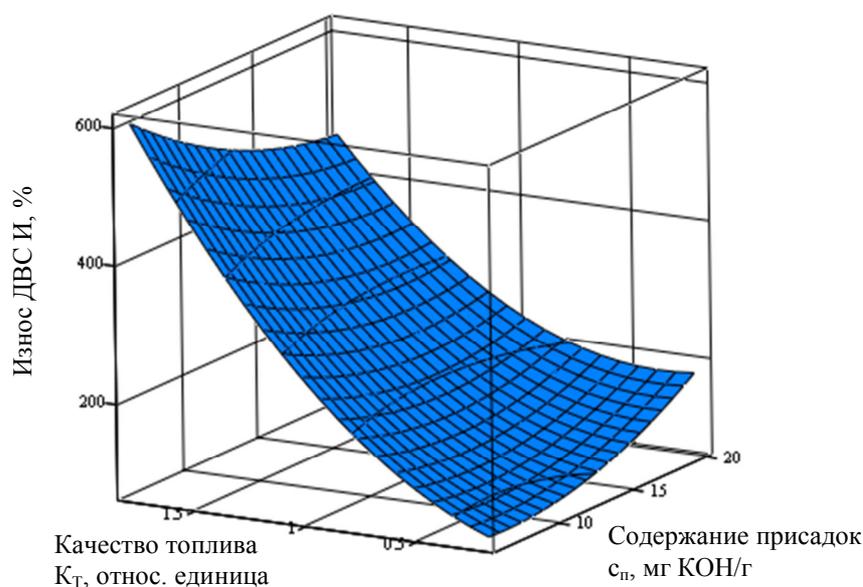


Рис. 8. Гиперповерхность отклика функции износа дизеля при факторе форсирования дизеля на верхнем уровне $p_{me} = 1,5$ МПа в зависимости от содержания присадок $c_{п}$ и качества применяемого топлива K_T при испытаниях РММ

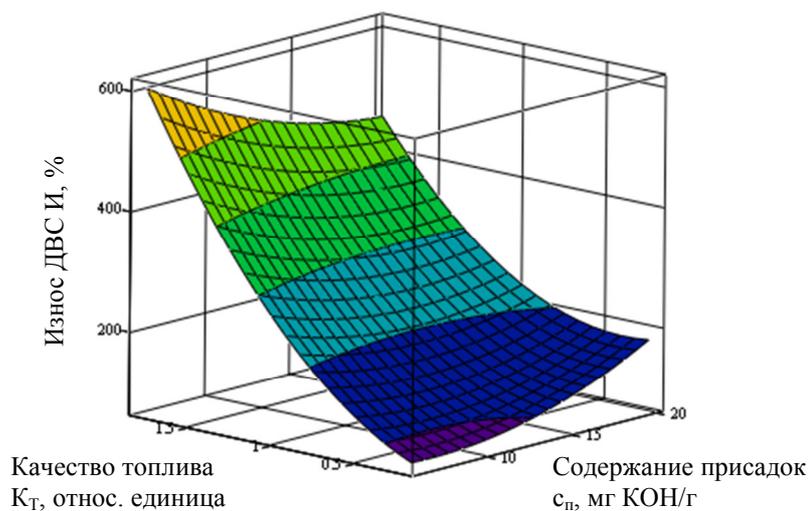


Рис. 9. Гиперповерхность отклика функции износа дизеля с визуализацией его параметров при факторе форсирования дизеля на верхнем уровне $p_{me} = 1,5$ МПа в зависимости от содержания присадок $c_{п}$ и качества применяемого топлива K_T при испытаниях РММ

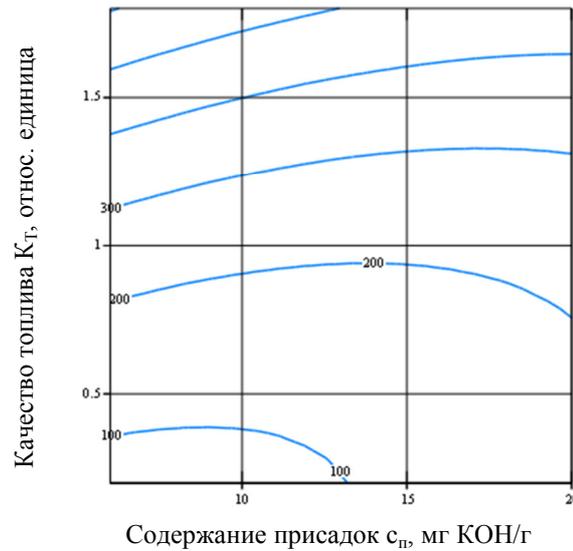


Рис. 10. Двумерные сечения отклика с линией одного уровня функции износа ДВС при факторе форсирования дизеля на верхнем уровне $p_{me} = 1,5$ МПа в зависимости от содержания присадок c_n и качества применяемого топлива K_T при испытаниях РММ

Наложение поверхностей отклика износа трибосопряжений дизеля (характеризующих эффективность РММ, применяемого в дизелях с разным уровнем форсирования мощности), приведённых на рис. 1, 2, 4, 5, 8 и 9, представлено на рис. 11 (поверхности обозначены как поверхность 1, поверхность 2 и поверхность 3).

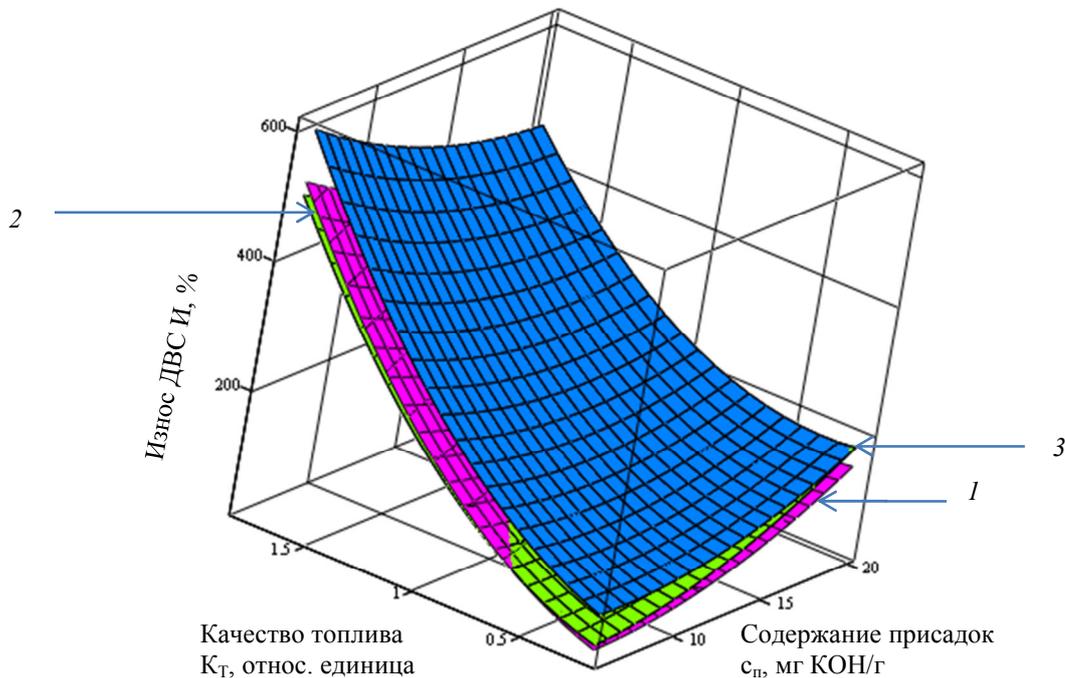


Рис. 11. Наложение гиперповерхностей отклика функций износа ДВС при факторах: форсирование дизеля на нулевом уровне ($p_{me} = 1,0$ МПа); форсирование дизеля на нижнем уровне ($p_{me} = 0,5$ МПа) и форсирование дизеля на верхнем уровне ($p_{me} = 1,5$ МПа) с визуализацией влияния степени форсирования на параметры износа ДВС в зависимости от содержания присадок c_n и качества применяемого топлива K_T при испытаниях РММ:

- 1 – гиперповерхность отклика функции износа ДВС при $p_{me} = 1,0$ МПа;
- 2 – гиперповерхность отклика функции износа ДВС при $p_{me} = 0,5$ МПа;
- 3 – гиперповерхность отклика функции износа ДВС при $p_{me} = 1,5$ МПа

Таким образом, на основании экспериментально-статистических данных была получена комплексная регрессионная модель оценки эффективности РММ с восстановленными легированием присадками эксплуатационными свойствами [1]. С её помощью можно определить необходимое количество вводимых присадок с учётом качества применяемого моторного топлива и уровня мощностных характеристик ДВС, характеризующего степень форсирования.

Двумерное сечение поверхностей отклика эффективности РММ в дизелях разного форсирования (см. рис. 3, 6 и 10) даёт визуальное представление изнашивания трибосопряжений ДВС от легирования РММ присадками с учётом применяемых топлив для судовых дизелей и позволяет оценить возможности РММ в эксплуатации судовых энергетических установок. Совмещение поверхностей отклика по износу ДВС даёт визуальное представление о процессах износа трибоузлов ДВС в зависимости от их уровня форсирования.

Выводы

1. Определено, что применение РММ возможно в судовых дизелях разной степени форсирования при условии легирования присадками до уровня свежих товарных масел для восстановления их добракочных, эксплуатационных показателей моторного масла.
2. Полученная модель изнашивания дизеля на РММ адекватна для машин со средним эффективным давлением $0,5 \div 1,5$ МПа и широким спектром качества применяемого топлива.
3. Установлено, что при экспериментально-статистическом моделировании эффективности РММ при их применении в ДВС разного уровня форсирования мощностями определяющими факторами являются содержание присадок и показатели качества применяемого судового топлива.
4. Предложены уравнения для численного расчёта необходимого количества вводимых присадок с учётом качества судового топлива, рекомендованного для данного типа дизеля.
5. Для наиболее целостного исследования причин, влияющих на эффективность РММ, требуются более глубокие исследования процессов безопасной эксплуатации судовых дизелей с использованием большего числа факторов, характеризующих регенерацию отработанных моторных масел, на основе экспериментально-статистического моделирования в лабораторных и эксплуатационных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кича Г. П., Тарасов В. В., Глушков С. В. Регенерирование отработанных моторных масел и восстановление их эксплуатационных свойств на судах // Мор. интеллектуал. технологии: сб. науч. тр. 2016. № 3 (33). Т. 1. С. 126–132.
2. Пиковская Е. В., Сурин С. А. Регенерация отработанных масел в США // Мир нефтепродуктов. 2000. № 4. С. 23–25.
3. Сурин С. А. Отработанные масла: вторая жизнь // Мир нефтепродуктов. 2000. № 2. С. 22–24.
4. Юзефович В. И. Организация сбора отработанных смазочных масел // Мир нефтепродуктов. 2001. № 3. С. 28–30.
5. Тарасов В. В., Соболенко А. Н. Рекомендации по глубине очистки от механических примесей регенерированных моторных масел разных эксплуатационных групп // Мор. интеллектуал. технологии. 2018. № 4 (42). Т. 5. С. 110–113.
6. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.

Статья поступила в редакцию 04.07.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тарасов Валерий Васильевич – Россия, 690059, Владивосток; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; профессор кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности; tarvv827@gmail.com.

Соболенко Анатолий Николаевич – Россия, 690059, Владивосток; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; sobolenko_a@mail.ru.



IMPACT OF PERFORMANCE PROPERTIES OF REGENERATED ENGINE OIL ON MARINE DIESEL WEAR WHEN IT RUNS ON DIFFERENT GRADES OF FUEL

V. V. Tarasov, A. N. Sobolenko

Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The article focuses on studying the operational properties of regenerated engine oils in terms of the impact on the wear of friction units of the trunk diesel engine when it works on the fuel of different grades. There have been built generalized models of marine diesel parts wear on the basis of experimental studies. Diesel 2Ч10,5/13 was used for experiments. Wear was determined by the method of artificial bases and by weighting. Four groups of the main indicators of fuels used on ships have been considered (depending on the quality indicator). The first group includes distillate fuels and low-viscosity marine fuel which is close in its characteristics to foreign fuels. The second group includes motor fuel, naval fuel oil and export fuels (medium viscosity fuels). The third group presents high-viscosity marine fuel; the fourth group - fuels made from the remains of oil refining. The description of the generalized model of details wear of the tested diesel engine was carried out by a polynomial of the second order. To obtain the model, a non-position plan was chosen for three test variables: concentration of additives in oil, a fuel quality factor and a level of diesel forcing. The superposition of the hypersurfaces of the response of wear functions of the internal combustion engine with diesel boosting factors at zero, lower, and upper levels with visualizing the effect on engine wear parameters depending on the additives concentration and quality of the fuel used in testing regenerated engine oil has been illustrated. Verification of the model's adequacy has proved that the model is adequate for machines with average effective pressure and a wide range of fuel grades. There has been given the possibility of using the obtained model to estimate the wear value at different values of parametric factors.

Key words: regenerated motor oil, model of wear, concentration of additives, fuel quality, forcing level, diesel.

For citation: Tarasov V. V., Sobolenko A. N. Impact of performance properties of regenerated engine oil on marine diesel wear when it runs on different grades of fuel. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019;4:71-81. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-71-81.

REFERENCES

1. Kicha G. P., Tarasov V. V., Glushkov S. V. Regenerirovanie otrabotannykh motornykh masel i vostanovlenie ih ekspluatatsionnykh svoystv na sudah [Regeneration of used motor oils and restoration of their operational properties on ships]. *Morskoe intellektual'nye tekhnologii: sbornik nauchnykh trudov*, 2016, no. 3 (33), vol. 1, pp. 126-132.
2. Pikovskaya E. V., Surin S. A. Regeneratsiya otrabotannykh masel v SShA [Used oil recovery in US]. *Mir nefteproduktov*, 2000, no. 4, pp. 23-25.
3. Surin S. A. Otrabotannye masla: vtoraya zhizn' [Used oils: second life]. *Mir nefteproduktov*, 2000, no. 2, pp. 22-24.
4. Yuzefovich V. I. Organizatsiya sbora otrabotannykh smazochnykh masel [Organization of collecting waste lubricating oils]. *Mir nefteproduktov*, 2001, no. 3, pp. 28-30.
5. Tarasov V. V., Sobolenko A. N. Rekomendatsii po glubine ochkistki ot mekhanicheskikh primesej regenerirovannykh motornykh masel raznykh ekspluatatsionnykh grupp [Recommendations on depth of purification from me-

chanical impurities of regenerated motor oils of defferent operational groups]. *Morskije intelektual'nye tekhnologii*, 2018, no. 4 (42), vol. 5, pp. 110-113.

6. Spiridonov A. A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh processov* [Planning experiment in study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p.

The article submitted to the editors 04.07.2019

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tarasov Valery Vasilyevich – Russia, 690059, Vladivostok; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Professor of the Department of Ecology and Life Safety; tarvv827@gmail.com.

Sobolenko Anatoly Nickolaevich – Russia, 690059, Vladivostok; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Marine Internal Combustion Engines; sobolenko_a@mail.ru.

