Судовые энергетические установки

DOI: https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-4
УДК 621.43.013:629.3

А.Н. Соболенко, В.В. Тарасов, М.И. Тарасов

СОБОЛЕНКО АНАТОЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор,
(автор, ответственный за переписку), SPIN: 9772-5366, sobolenko_a@mail.ru
ТАРАСОВ ВАЛЕРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ, профессор, SPIN: 8009-8968, tarvv827@gmail.com
ТАРАСОВ МАКСИМ ИГОРЕВИЧ, аспирант, SPIN: 8492-9839, nadezkin@msun.ru
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
Владивосток, Россия

Браковочные показатели регенерированного в установке «РУМС-1» и свежего моторных масел

Аннотация: Приведены результаты сравнительных испытаний в судовом форсированном дизеле моторных масел – свежего и отработанного (после восстановления регенерацией в установке «РУМС-1»). Отработанное моторное масло было восстановлено до исходного уровня моторных свойств регенерацией и добавлением соответствующих присадок. В результате экспериментальных испытаний и обработки данных получены математические модели изменения в зависимости от наработки следующих показателей: коллоидного загрязнения, смолообразования, содержания нерастворимых примесей, щелочного числа, кислотного числа, водородного показателя pH, вязкости. Показано одинаковое изменение эксплуатационных свойств товарного и регенерированного масел по их влиянию на состояние деталей двигателя и работу агрегатов системы смазки. Полученные математические модели изменения браковочных показателей моторного масла могут использоваться для прогнозирования срока службы масла.
Ключевые слова: регенерированное масло, браковочные показатели, моторные испытания

Характеристики регенерированных моторных и свежих масел

При работе в двигателях внутреннего сгорания с течением времени происходит изменение свойств масла: разложение, окисление, полимеризация и конденсация углеводородов, разжижение горючим и обводнение. В результате в маслах накапливаются асфальто-смолистые соединения, коллоидальные кокс и сажа, различные соли, кислоты, а также металлическая пыль и вода. Весь этот сложный процесс изменения физико-химических свойств масла называется старением, ему посвящен ряд работ (см., например, [1, 2, 8]). Вместе с тем вопрос старения регенерированных моторных масел изучен недостаточно.

Цель статьи – выявление закономерностей изменения браковочных показателей при работе регенерированного моторного масла по сравнению со свежим маслом.

Для выявления этих закономерностей были проведены эксперимент в судовом форсированном дизеле [6, 7].

Для восстановления исходных моторных свойств при помощи регенерации мы выбрали моторное масло М-10-$Г_2$(цс), ГОСТ 12337-84.

После регенерации с использованием установки «РУМС-1» и штатных средств «мягкого» центрифугирования в масло были добавлены многофункциональные присадки, также

© Соболенко А.Н., Тарасов В.В., Тарасов М.И., 2021
Статья: поступила: 02.04.2021; рецензия: 05.04.2021; финансирование: Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского.

использовались присадки направленного стабилизирующего действия. Присадки добавлялись до полного восстановления исходных показателей моторного масла.

Показатели свежего масла:

- содержание воды – нет;
- щелочное число – 9,0 (мг КОН)/г;
- вязкость кинематическая при 100 °С – 10,4 мм^2/с;
- кислотное число – 0,4 (мг КОН)/г;
- зольность – 1,5%;
- коллоидное загрязнение – 0,2%;
- температура вспышки в открытом тигле – 220 °С;
- содержание нерастворимых примесей – 0,14%.

Путем регенерации физико-химические показатели отработанного масла были восстановлены до следующего уровня [3, 4]:

- содержание воды – нет;
- кислотное число – 0,7 (мг КОН)/г;
- коллоидное загрязнение – 0,36%;
- вязкость кинематическая при 100 °С – 10,3 мм^2/с;
- щелочное число – 9,2 (мг КОН)/г;
- зольность –1,6%;
- температура вспышки в открытом тигле – 210 °С;
- содержание нерастворимых примесей – 0,31%.

Полученное регенерированное масло применено для эксперимента наряду со свежим.

Методика эксперимента

Испытания проводились на дизеле марки 8ЧНСП18/22 с номинальной мощностью N_e = 232 кВт при частоте вращения n = 750 мин$^{-1}$. При использовании дизельного топлива марки «Л» (ГОСТ 305-2013) угар масла во время эксперимента был стабильный и находился в пределах 1,38÷1,42 г/(кВт·ч). Средняя нагрузка дизеля составляла 181±9 кВт, т.е. в пределах (78±5)% от номинальной и была одинаковой на всех этапах испытаний. Для компенсации угара долив масла осуществлялся через каждые 24 ч наработки. Отбор проб масла из картера дизеля для определения показателей производился через каждые 200 ч наработки.

Анализ результатов эксперимента и построение моделей

Результаты эксперимента представлены в виде графиков на рисунках 1–7 и обработаны с помощью программы Advanced Grapher для получения регрессионных моделей изменения исследованных параметров в зависимости от наработки.

Смолообразование. Как показано на рис. 1, по мере наработки масла в дизеле смолообразование увеличивается как в регенерированном, так и в свежем масле. Наиболее интенсивно накопление смол идёт в первые 200 ч наработки, затем оно замедляется. Увеличение смолообразования в свежем масле присходит примерно в 1,5 раза быстрее. За 2000 ч наработки содержание смол в товарном масле увеличилось с 2,1 до 12%, т.е. в 5,7 раз, а в регенерированном масле – с 4,7 до 8,4% – в 1,8 раза. Это объясняется тем, что в регенерированном моторном масле менее стабильные моноциклические парафино-нафтеновые углеводороды присутствуют в минимальном количестве. В свежем товарном масле углеводороды представлены значительными долями. В зоне цилиндропоршневой группы температурные условия благоприятны для термоокислительной деструкции углеводородов, что приводит к повышенному смолообразованию [5].

Регрессионным анализом по данным экспериментов были подобраны математические модели смолообразования, которые имеют следующий вид:

– для свежего масла *См* = 11,03·τ^{0,233} при среднеквадратичном отклонении σ^2 = 0,637 и коэффициенте корреляции R^2 = 0,987;

– для регенерированого масла *См* = 7,346 τ^{0,228} при среднеквадратичном отклонении σ^2 = 0,226 и коэффициенте корреляции R^2 = 0,995,

где τ = (0,001÷2,0) – наработка дизеля, тыс. ч;

См – смолообразование масла, %.

Коллоидное загрязнение моторного масла. Характер изменения коллоидного загрязения моторного масла по мере наработки дизеля представлен на рис. 2. В начальный период испытаний примерно до 0,7 тыс. ч процент коллоидного загрязнения интесивно увеличивается, затем его увеличение происходит менее интенсивно.

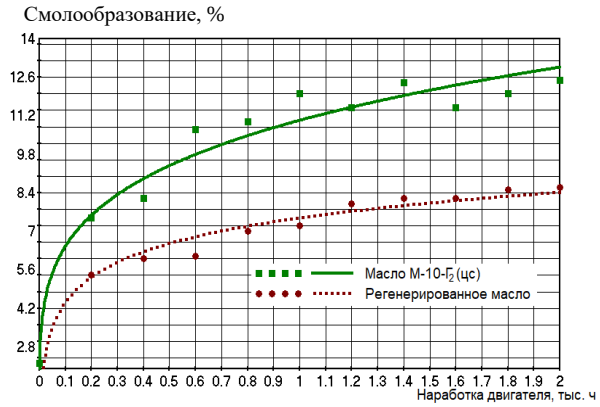

Рис. 1. Характер изменения смолообразования регенерированного и свежего моторных масел по мере наработки в дизеле

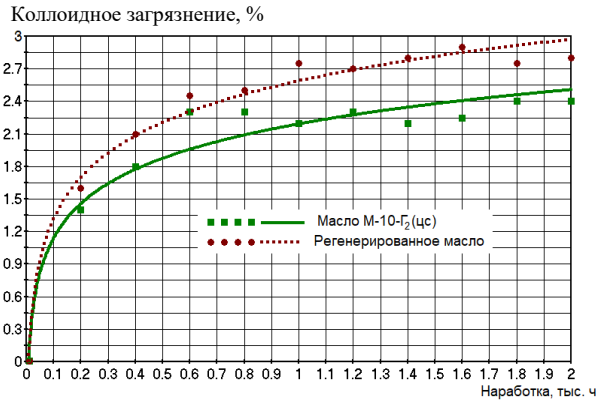

Рис. 2. Изменение коллоидного загрязнения регенерированного и свежего масла по мере наработки в дизеле

Математическаая модель коллоидного загрязнения:

– для свежего масла КЗ = 0,456·ln(τ) + 2,192 при среднеквадратичном отклонении σ^2 = 0,152 и коэффициенте корреляции R^2 = 0,954;

– для регенерированого масла КЗ = 0,554·ln(τ) + 2,587 при среднеквадратичном отклонении σ^2 = 0,109 и коэффициенте корреляции R^2 = 0,983,

где τ = (0,01÷ 2,0) – наработка дизеля, тыс. ч;

КЗ – коллоидное загрязнение масла, %.

Загрязнение моторного масла нерастворимыми примесями (НРП). Характер изменения загрязения моторного масла НРП по мере наработки дизеля представлен на рис. 3. В начальный период испытаний примерно до 750 ч наработки процент содержания НРП интенсивно увеличивается, затем происходит стабилизация на уровне 1,92÷2,04 % для свежего масла и 2,04–2,16 % – регенерированного масла.

Графики показывают, что содержание НРП в товарном моторном масле при наработке более 750 ч было в среднем на 5,6% меньше, чем в регенерированном моторном масле. Это свидетельствует о более интенсивной карбонизации регенерированного моторного масла

Математическая модель изменения содержания НРП:

– для свежего масла Сх = 0,4·τ^3 – 1,82·τ^2 + 2,75·τ +0,15 при коэффициенте корреляции R^2 = 0,984 и среднеквадратичном отклонении σ^2 = 0,0578;

– для регенерированого масла Сх = 0,582·τ^3 – 2,475·τ^2 + 3,5·τ +0,467 при среднеквадратичном отклонении σ^2 = 0,0574 и коэффициенте корреляции R^2 = 0,989,

где τ = (0,01÷ 2,0) – наработка дизеля, тыс. ч;

Сх – содержание НРП , %.

Процесс срабатывания присадок оценивался по показателю щелочного числа масла (согласно ГОСТ 11362-96). В результате выявлено, что у регенерированного моторного масла за весь этап испытаний щёлочное число было на 2÷12% больше, чем у товарного масла. По мере наработки происходило уменьшение щулочного числа масла (рис. 4) со стабилизацией его на уровне 2,9÷3,3 мг КОН/г при наработке 2,0 тыс. ч. При работе на дизельном топливе с содержанием серы до 0,5% этого запаса щелочности достаточно для нейтрализации образующихся органических кислот [5].

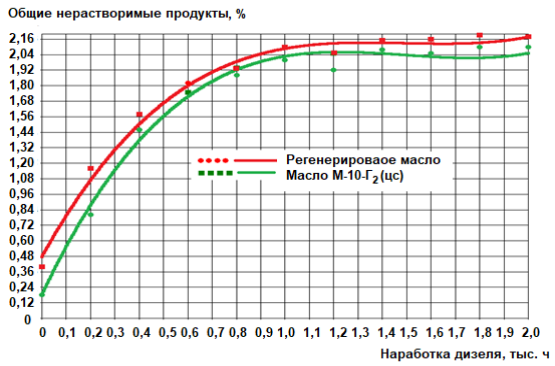

Рис. 3. Изменение содержания нерастворимых продуктов в регенерированном и свежем моторных маслах по мере наработки в дизеле

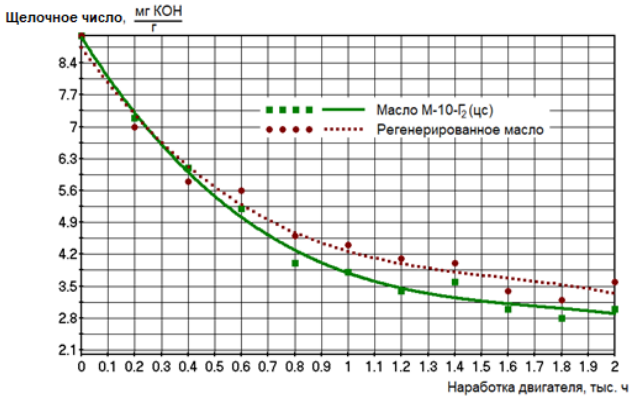

Рис. 4. Изменение щелочного числа, характеризующее срабатывание присадок, регенерированного и свежего масел по мере наработки в дизеле

Математическая модель изменения щелочного числа имеет вид:

– для свежего масла $Щ = -0{,}976\cdot\tau^3 + 5{,}07\cdot\tau^2 - 9{,}276\cdot\tau + 8{,}97$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma^2 = 0{,}184$ и коэффициенте корреляции $R^2 = 0{,}991$;

– для регенерированного масла $Щ = -1{,}034\cdot\tau^3 + 4{,}88\cdot\tau^2 - 8{,}34\cdot\tau + 8{,}752$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma^2 = 0{,}26$ и коэффициенте корреляции $R^2 = 0{,}978$,

где $\tau = (0{,}01 \div 2{,}0)$ – наработка дизеля, тыс. ч;

$Щ$ – щелочное число масла, мг КОН/г.

Показатель *кислотное число масел* по мере наработки дизеля увеличивался и после 1200 ч наработки стабилизировался на уровне 2,8 и 3,7 мг КОН/г соответственно для товарного и регенерированного масел (рис. 5).

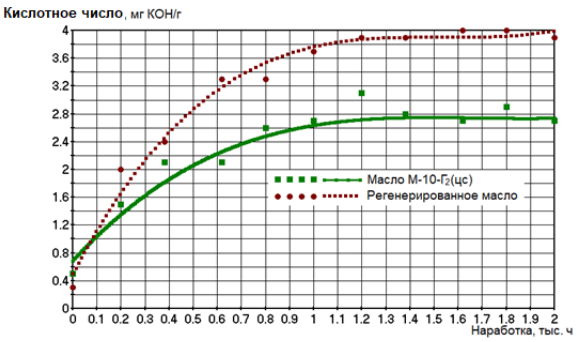

Рис. 5. Изменение кислотного числа регенерированного и свежего масла по мере наработки в дизеле

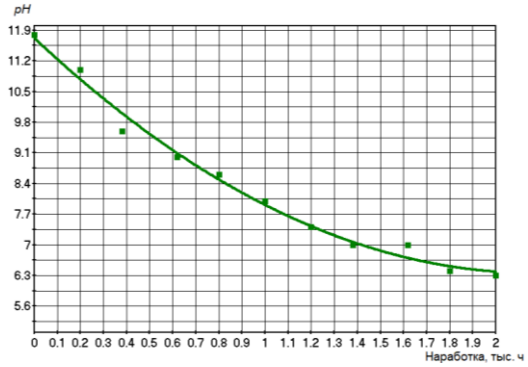

Рис. 6. Изменение показателя *pH* регенерированного масла по мере наработки в дизеле

Математические модели кислотного числа в зависимости от наработки имеют следующий вид:

– для свежего масла $К = 0{,}517\cdot\tau^3 - 2{,}662\cdot\tau^2 + 4{,}326\cdot\tau + 0{,}5996$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma^2 = 0{,}149$ и коэффициенте корреляции $R^2 = 0{,}969$;

– для регенерированного масла $К = 1{,}318\cdot\tau^3 - 5{,}418\cdot\tau^2 + 7{,}342\cdot\tau + 0{,}434$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma^2 = 0{,}179$ и коэффициенте корреляции $R^2 = 0{,}974$,

где $\tau = (0{,}01 \div 2{,}0)$ – наработка дизеля, тыс. ч;

К – кислотное число масла, мг КОН/г.

Такое значение кислотного числа моторного масла не представляет опасности коррозии для подшипников дизеля, так как используемые моторные масла к концу этапа испытаний имели значение водородного показателя *pH*=6,3, что весьма близко к нейтральному раствору, у которого *pH*=7 (рис. 6). Показатель кислотного числа отражал содержание не только органических кислот, но и некоторых продуктов срабатывания присадок, которые не поддаются нейтрализации. Поэтому к концу испытаний кислотное число было больше у регенерированного масла вследствие большего количества сработанных присадок.

Математическая модель показателя *pH* в зависимости от наработки имеет вид

$pH = 1{,}142\cdot\tau^2 - 4{,}975\cdot\tau + 11{,}758$ при стандартном среднеквадратичном отклонении $\sigma^2 = 0{,}156$ и коэффициенте корреляции $R^2 = 0{,}993$,

где $\tau = (0{,}01 \div 2{,}0)$ – наработка дизеля, тыс. ч.

Вязкость регенерированного масла в период наработки 1000 ч увеличилась всего на 1,9%. Значение вязкости находилось в пределах 10,5÷10,6 сСт. При наработке в промежутке 1000÷2000 ч работы произошло небольшое повышение вязкости масел до 11,8 сСт у свежего и до 11,7 сСт – у регенерированного масла (рис. 7). Это объясняется увеличением концентрации НРП и усилением разрушения сруктуры углеводородов [5]. За 2000 ч наработки произошло следующее возрастание вязости моторного масла: у свежего – на 13%, у востановленного регенерацией – на 11,4%. Разность в вязкости между исследованными маслами находится в пределах 0,2 сСт, т.е. не значима.

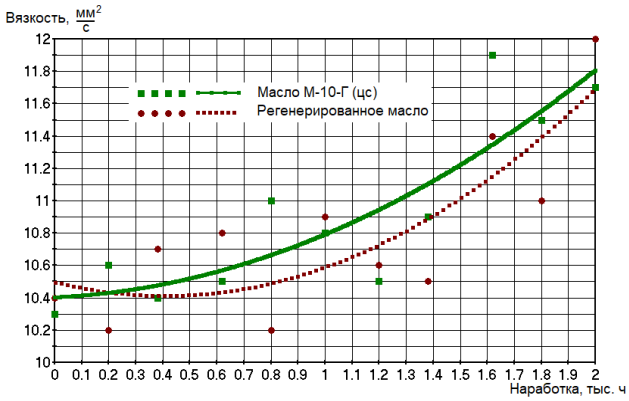

Рис. 7. Изменение вязкости регенерированного и свежего масла по мере наработки в дизеле

Подобранные уравнениия регрессии:

– для свежего масла $\nu = 0{,}303\cdot\tau^2 + 0{,}094\cdot\tau + 10{,}4$ при стандартном среднеквадратичном отклонении $\sigma^2 = 0{,}275$ и коэффициенте корреляции $R^2 = 0{,}75$;

– для регенерированного масла $\nu = 0{,}437\cdot\tau^2 - 0{,}32\cdot\tau + 10{,}48$ при стандартном среднеквадратичном отклонении $\sigma^2 = 0{,}314$ и коэффициенте корреляции $R^2 = 0{,}62$,

где $\tau = (0{,}01 \div 2{,}0)$ – наработка дизеля, тыс. ч.

ν – вязкость масла сСт.

Заключение

Браковочные показатели свежего и регенерированного моторных масел при равной наработке отличаются незначительно. Можно предположить, что как свежие, так и регенерированные масла ещё могут использоваться до наработки 3000 ч. При этом при наработке 2000 ч щелочное число регенерированного масла оказывается больше, чем у свежего. Известно, что для дизелей, имеющих температуру поршня в районе верхнего поршневого кольца 230 °С и более, снижение щёлочного числа ниже 2,5 (мг КОН/г) недопустимо. В этом аспекте регенерированное масло имеет больший ресурс по сравнению со свежим маслом.

Вторым параметром, ограничивающим срок службы рассматриваемых моторных масел, является увеличение вязкости, вызываемое высоким значением коллоидного загрязнения и наличием НРП. Уменьшить эти нежелательные явления можно посредством интенсивной очистки в судовом центробежном сепараторе и масляной центрифуге.

Сравнение показателей регенерированного и свежего моторных масел после 2000 ч наработки показывает весьма близкие значения почти по всем параметрам.

Повышение температуры вспышки моторных масел до 228÷230 °С объясняется выпариванием легкокипящих фракций.

Загрязение НРП, коллоидное загрязнение и срабатывание присадок имеют место в обоих видах моторного масла. При низком стабильном угаре масла, при 1,3÷1,5 г/(кВт·ч) и температурах поршней до 230 °С основным браковочным показателем обычного моторного масла оказывается смолообразование, а для регенерированного моторного масла – кислотное число и образование НРП.

Скорость изменения браковочных показателей ргенерированного моторного масла и свежего моторного масла практически одинакова.

Таким образом, можно заключить, что регенерированное моторное масло по основным браковочным показателям после наработки 2000 ч не уступает свежему маслу после такой же наработки. Его применение в двигателях типа ДД103 и ДД104 на т/х «Находкинский рабочий» показало возможность полного соблюдения моторесурса, задаваемого техническими условиями на эксплуатацию, при выполнении регламента технического обслуживания.

Полученные математические модели изменения браковочных показателей моторного масла могут использоваться для прогнозирования срока службы масла.

Дальнейшие исследования необходимо проводить при увеличении наработки с целью экспериментального определения предельно достижимого срока службы регенерированного моторного масла.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьев В.А., Бойков Д.В., Григорьев М.А. и др. Влияние топлив на старение моторных масел в автомобильных дизелях // Химия и технология топлив и масел. 1993. № 5. С. 11–13.
2. Бенуа Г.Ф., Данилова Е.В., Точильников Д.Г. Сравнение процессов старения товарного и регенерированного моторных масел при работе в судовом дизеле // Двигателестроение. 1979. № 11. С. 46–48.
3. Глущенко А.А. Разработка технологии и технического средства для восстановления эксплуатационных свойств отработанного моторного масла: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ульяновск, 2009. 20 с.
4. Евдокимов А.Ю. Регенерация отработанных смазочных масел. М.: МИХН; ГП, 1982. 18 с.
5. Закупра В.А., Тукачёв В.Т., Крыгин П.М. и др. Оценка степени старения моторного масла в тепловом дизеле // Химия и технология топлив и масел. 1993. № 5. С. 26–28.
6. Тарасов В.В., Соболенко А.Н., Тарасов М.И. Эффективность применения регенерированного моторного масла, легированного присадками, в судовых дизелях разной форсировки // Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т. 2, № 1(47). С. 116–122.

7. Тарасов В.В., Кича Г.П., Деревцов Е.М. Результаты эксплуатационных сравнительных испытаний в судовом форсированном дизеле регенерированного и товарного моторных масел // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2016. № 2. С. 29–36.
8. Brinkman D.W., Whisman M. Proc. Jnt. conf. Waste oil recovery and reuse. Washington D.C.,1978. 230 p.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2021. N 2/47
Marine Engines and Auxiliary Machinery www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-4

Sobolenko A., Tarasov V., Tarasov M.

ANATOLY SOBOLENKO, Doctor of Engineering Sciences,
Professor (Corresponding Author), sobolenko_a@mail.ru
VALERY TARASOV, Professor, tarvv827@gmail.com
MAXIM TARASOV, Postgraduate Student, nadezkin@msun.ru
Marine State University named after Admiral G.I. Nevelskoy
Vladivostok, Russia

Rejection indicators of motor oils – fresh one, and the one recovered in RUMS-1 unit

Abstract: The results of comparative tests of fresh and waste engine oils recovered by regeneration in RUMS-1 unit in the vessel's forced diesel engine are presented. The used engine oil was restored to its original level of properties by regeneration and addition of the respective additives. As a result of tests and data processing, mathematical models of changes depending on the operating time of the following indicators were obtained: colloidal contamination, tar formation, content of insoluble impurities, top basic number, acid number, hydrogen index pH, and viscosity. The same change in the operational properties of commercial and regenerated oil is shown in terms of their effect on the condition of engine parts and overall operation of the lubrication system units. The obtained mathematical models of changes in rejection parameters of engine oil can be used to predict the service life of engine oil.
Keywords: regenerated oil, rejection indicators, engine oil tests

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

.

REFERENCES

1. Artemyev V.A., Boikov D.V., Grigoryev M.A., et al. The influence of fuels on aging of engine oil automotive diesel engines. Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 1993(5):1–13.
2. Benoit G.F., Danilova E.V., Tochilnikov D.G. Compare processes of ageing product and regenerated oils when you work in a marine diesel engine. The Engine. 1979(11):46–48.
3. Glushchenko A.A. Development of technology and technical means for restoring the operational properties of spent engine oil, autoref. Diss. ... Candidate of Technical Sciences. Ulyanovsk, 2009, 20 p.
4. Evdokimov A.Yu. Regeneration of spent lubricating oils. M., MIHN & GP, 1982, 18 p.
5. Zakupra V.A., Tukachev V.T., Krygin P.M. et al. Assessment of the degree of aging of motor oil in thermal diesel. Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 1993(5):26–28.
6. Tarasov V.V., Sobolenko A.N., Tarasov M.I. Efficiency of application of regenerated motor oil doped with additives in ship diesels of different forcing. Marine Intellectual Technologies. 2020;2(47):116–122.
7. Tarasov V.V., Kitscha G.P., Derevtsov E.M. The operational Results of comparative tests in marine forced diesel regenerated and trademark diesel engine oils. Protection of Environment in Oil and Gas Industry. 2016(2):29–36.
8. Brinkman D.W., Whisman M. Proc. Jnt. Conf. Waste oil recovery and reuse. Washington D.C., 1978. 230 p.