

Научная статья

DOI: 10.15593/24111678/2023.04.05

УДК 621.431/620.169+621.43.038.722

В.Д. Исаенко, А.В. Исаенко, П.В. ИсаенкоТомский государственный архитектурно-строительный университет,
Томск, Российская Федерация**МАСЛО В ДВИГАТЕЛЕ ДОЛЖНО БЫТЬ ЧИСТЫМ**

Представлены результаты исследования состояния трибологической системы с дизельными двигателями КамАЗ-740.10 («Евро-0») и КамАЗ-760.62 («Евро-3»), работавших на стандартных маслах: M10G₂K на минеральной основе и SAE 5W-40 на полусинтетической основе соответственно и их смешивании в соотношениях (85+15) %. По ходу исследования было обнаружено, что при работе на смешанных маслах сигнализаторы загрязнённости масляной системы срабатывали уже при наработке 5–6 тыс. км. При этом отмечалось, что отбираемые для анализов пробы отработавших смешанных масел после отстоя имели темно-бурые осадки, отсутствующие в стандартных маслах. А при ТО системы смазки наблюдались шламобразные отложения мазеподобного характера на внутренних и внешних поверхностях фильтроэлементов с видимыми вмятинами фильтрующей шторы и оторванными крышками. Показано, что между концентрацией негорючих механических примесей в работающем масле и износом железосодержащих деталей существует тесная корреляционная связь ($r = 0,85-0,87$) в виде $Fe = f(NP)$. Отмечено, что в зоне малых концентраций негорючие примеси на процесс изнашивания деталей заметного влияния не оказывают, независимо от марки масла. В этой зоне частицы загрязнения носят низкодисперсный характер, соизмеримый с толщиной масляной плёнки на трущихся поверхностях сопряженных деталей. Содержание износа железа выше браковочной нормы резко возрастает при негорючих примесях больше 0,1 %. Работа двигателей на масле SAE в 2 раза снижает износ. Сделан вывод о целесообразности применения масляных центрифуг независимо от марки масел, что поспособствует повышению эксплуатационного ресурса их деталей и масляных фильтров тонкой очистки.

Ключевые слова: дизель, центрифуга, моторное масло, механические примеси, трибологическая система, очистка, центробежный масляный фильтр, щелочное число, ресурс.

V.D. Isaenko, A.V. Isaenko, P.V. Isaenko

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russian Federation

THE ENGINE OIL MUST BE CLEAN

The article presents the results of a study of the state of the tribological system with KamAZ-740.10 (Euro-0) and KamAZ-760.62 (Euro-3) diesel engines operating on standard oils: M10G₂K on a mineral basis and SAE 5W-40 on a semi-synthetic basis, respectively, and their mixing in ratios (85+15) %. In the course of the study, it was found that when working on mixed oils, the pollution alarms of the oil system were triggered already at the operating time of 5–6 thousand km. At the same time, it was noted that the samples of spent mixed oils selected for analysis after settling had dark brown precipitation, absent in standard oils. And with the lubrication system, sludge deposits of an ointment-like nature were observed on the internal and external surfaces of filter elements with visible dents of the filter curtain and torn covers. It is shown that there is a close correlation ($r = 0.85-0.87$) in the form of $Fe = f(NP)$ between the concentration of nonflammable mechanical impurities in the running oil and the wear of iron-containing parts. It is noted that in the zone of low concentrations, non-combustible impurities do not have a noticeable effect on the wear process of parts, regardless of the brand of oil. In this zone, the contamination particles are of a low-dispersed nature, commensurate with the thickness of the oil film on the rubbing surfaces of the mated parts. The content of wear iron above the rejection rate increases sharply with non-combustible impurities greater than 0.1 %. The operation of engines on SAE oil reduces wear by 2 times. The conclusion is made about the expediency of using oil centrifuges regardless of the brand of oils, which will contribute to increasing the operational life of their parts and fine oil filters.

Keywords: diesel, centrifuge, engine oil, mechanical impurities, tribological system, cleaning, centrifugal oil filter, alkaline number, resource.

Многолетний опыт эксплуатации автотранспортных средств (АТС) показал, что качество моторного масла двигателей внутреннего сгорания (ДВС) по своим показателям может существенно отличаться от стандартных значений (ГОСТ 12337-2020) и технического регламента [1] в силу корректировки реальными условиями и эффективностью средств очистки

масла. А поскольку двигатель и масло составляют единую трибологическую систему «ДВС – масло», то долговечность его базовых деталей всецело зависит от качества масла в процессе её работы [2; 3].

Под качеством масла следует понимать свойства и состояние его внутренних резервов в рамках стандартных показателей, ранжированных по весовой категории влияния на состояние системы в следующем порядке: механические примеси – 0,242; вязкость – 0,125; диэлектрическая проницаемость – 0,101; щелочное число – 0,091; моюще-диспергирующие свойства – 0,081; содержание воды – 0,081; кислотное число – 0,071; плотность – 0,071; оптическая плотность – 0,061 и температура вспышки – 0,051 [4].

Очевидно, что наиболее значимыми показателями, определяющими состояние системы «ДВС – масло» являются: загрязнённость, вязкость, проницаемость и щелочное число.

В процессе работы моторное масло меняет свой первоначальный физико-химический состав за счёт загрязнений различного характера, что приводит к увеличению его диэлектрической постоянной. Однако, несмотря на имеющуюся корреляционную связь с иными показателями качества, она не оказывает заметного влияния на общее состояние трибологической системы. И при решении практических задач по эксплуатационной надёжности трущихся деталей ДВС в расчёт не принимается.

Другое дело – щелочное число (ЩЧ). При низкотемпературном режиме работы двигателя в зонах работы поршневых колец могут образовываться продукты конденсата, так что даже при небольшом содержании серы в топливе в них содержатся капли высококонцентрированной серной кислоты, обладающей сильным коррозионным действием на металлы. Для снижения этого явления в композицию присадки вводят щелочные элементы, нормируемые стандартами как щелочное число. И чем оно выше, тем нейтрализующие свойства масла сохраняются дольше на достаточном уровне, снижая износ деталей.

В задачу вязкости моторного масла входит обеспечение устойчивой плёнки на поверхностях трущихся деталей двигателя. Во время его работы вязкость может либо повышаться, ускоряя процесс окисления и создавая вязкостное торможение, снижая ресурс масляных фильтров, либо снижаться, не обеспечивая необходимой толщины плёнки и приводя узел трения к масляному голоданию. И в том, и в другом случае возникает абразивный износ сопряжённых деталей в определённой степени.

Основную же долю абразивного изнашивания деталей привносит загрязнённость масла, которая по сути представляет собой конгломерат механических примесей, состоящих из органических и неорганических компонентов. Первая их группа содержит в основном продукты окисления масла и топливных фракций, а также продукты неполного сгорания топлив. Эти продукты загрязнения способствуют образованию лаковых и шламовых отложений на составляющих системы «ДВС – масло» и снижает их ресурс. Концентрация органических примесей зависит, главным образом, от первоначальных свойств топлив и масел, а также от температурного режима работы двигателя. Вторая группа механических примесей содержит в основном атмосферно-дорожную пыль с частицами высокой твёрдости, зольную часть присадки и частицы износа конструкционных металлов деталей. Эта негорючая составляющая примесей (НП) и приводит к массовому абразивному изнашиванию сопряжённых поверхностей.

Степень их влияния на износ зависит, прежде всего, от дисперсного состава пыли и содержания основного её компонента – кремния (Si), являющегося своеобразным индикатором абразивного изнашивания [5–7].

В нашей стране заслуженную популярность приобрели грузовые автомобили с дизельными двигателями КамАЗ и МАЗ, оснащённые смешенной системой очистки масла. Так, если на ранее выпускаемых дизельных двигателях КамАЗ, не входящих в экологический класс, устанавливали фильтры тонкой очистки масла (ФТОМ) на полном потоке и центрифугу (ЦФ) на ответвлении, то на современные дизельные двигатели классов от «Евро-3» до «Евро-5» устанавливают фильтры тонкой и грубой очистки (ФГОМ) вместо центрифуги.

Отказываясь от центрифуг, моторостроители исходили из того, что для современных дизельных двигателей разработан целый ряд моторных масел с высокоэффективными моуще-диспергирующими, антиокислительными, противоизносными и антифрикционными присадками, исключая образование шламовых отложений, для задержания которых требуется центробежная очистка. Следует, однако, отметить, что такие известные фирмы, как MAN, SCANIA и другие, от центрифуг не отказываются, несмотря на использование качественных моторных масел класса «Евро».

Опыт эксплуатации АТС в современных условиях показывает, что автопредприятия наряду с дизельными двигателями «Евро»-классов в массовом порядке используют и дизельные двигатели старых поколений, что вызывает определённую неразбериху в выборе необходимой марки масла вплоть до их перемешивания при обслуживании системы смазки [8].

В настоящей работе приведены результаты исследования состояния трибологической системы с дизельными двигателями КамАЗ-740.10 («Евро-0») и КамАЗ-760.62 («Евро-3»), работавших на стандартных маслах: М10Г₂К на минеральной основе и SAE 5W-40 на полусинтетической основе соответственно и их смешивании в соотношениях (85+15) %.

Значения показателей качества свежих и отработавших масел до очередного технического обслуживания № 2 (ТО-2) дизельных двигателей КамАЗ в летний период представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения показателей качества свежих и работающих моторных масел и их смесей

| Показатели | Свежее масло | | Отработавшее масло в дизельных двигателях | | | | | |
|------------------------------|---------------------|-----------|---|---|--------------------|--------------------|---|-----|
| | | | КамАЗ-740.10 | | | КамАЗ-760.62 | | |
| | М10Г ₂ К | SAE 5W-40 | М10Г ₂ К 100 % | М10Г ₂ К+ SAE 5W-40 85 % +15 % | SAE 5W-40 100 % | SAE 5W-40 100 % | SAE 5W-40+ М10Г ₂ К 85 % +15 % | |
| Наработка масла, тыс. км | 0 | 0 | 8,25 | 7,79 | 15,3 | 14,5 | 13,85 | |
| Негорючие примеси, % | 0,006 | 0,002 | 0,085 | 0,18 | 0,027 | 0,015 | 0,28 | |
| Вязкость (η), сСт | 8,5 | 12,8 | 9,0 | 11,3 | 12,6 | 10,6 | 16,4 | |
| Щелочное число (ЩЧ), мгКОН/г | 7,4 | 12,1 | 5,4 | 7,4 | 9,7 | 8,7 | 6,6 | |
| Масса отложений, г | ФТОМ | – | – | 315 | 405 | 271 | 297 | 367 |
| | ЦФ | – | – | 6,6 | 870 | 97 | – | – |
| | ФГОМ | – | – | – | – | – | 105 | 120 |

Из данных табл. 1 следует, что показатели качества свежих масел количественно значительно разнятся между собой, что отражается и на отработавших в пределах очередных ТО-2. Обращают на себя внимание негорючие примеси. Их содержание в свежем масле М10Г₂К более чем в 3 раза выше, чем в масле SAE 5W-40. Видимо, присадки полусинтетики менее зольные. Процесс работы дизельных двигателей увеличивает их приращение на каждую тысячу километров пробега на 0,01 % в минеральном масле и на порядок меньше, чем в синтетике. Смешивание масел приводит к их нарастанию до (0,02–0,03) % / 1000 км, что отражается на массовом содержании шламовых отложений на фильтрах очистки. При этом в роторе центрифуги их в 2 с лишним раза больше, чем на ФТОМ при работе на минеральном масле. При работе дизельных двигателей на синтетическом масле происходит перераспределение долей: их на ФТОМ в 2,8 раза больше, чем в роторе ЦФ, что в какой-то степени подтверждает решение моторостроителей. Смешивание масел в указанных пропорциях увеличивает массу отложений в дизельных двигателях «Евро-0» в 1,7–2,0 раза, в «Евро-3» – 1,15–1,25 раза. В целом же отложений в агрегатах очистки масла дизельных двигателей КамАЗ-760.62 в 2,3–2,55 раза меньше, чем в масле КамАЗ-740.10, что свидетельствует в пользу полусинтетического масла.

По ходу исследования было обнаружено, что при работе на смешанных маслах сигнализаторы загрязнённости масляной системы срабатывали уже при наработке 5–6 тыс. км. При этом отмечалось, что отбираемые для анализов пробы отработавших смешанных масел после отстоя имели темно-бурые осадки, отсутствующие в стандартных маслах. А при техническом обслуживании системы смазки наблюдались шламовые отложения мажеобразного характера на внутренних и внешних поверхностях фильтроэлементов с видимыми вмятинами фильтрующей шторы и оторванными крышками (рис. 1).

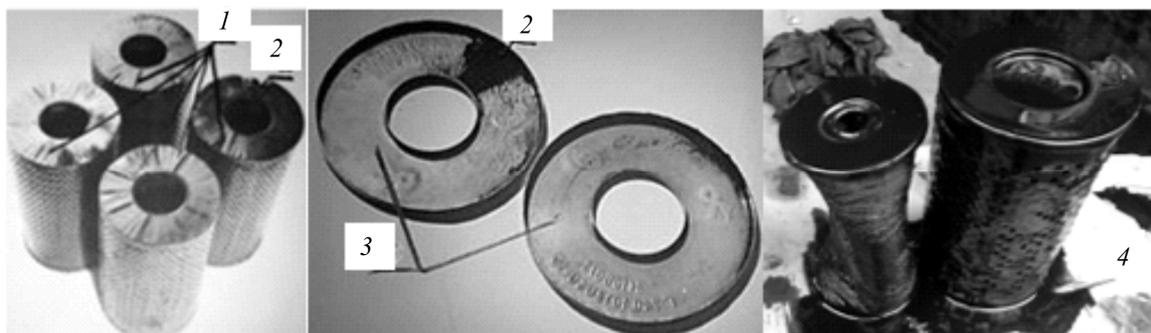


Рис. 1. Вид фильтроэлементов при работе дизельных двигателей на смешанных маслах: 1 – сквозные радиальные щели; 2 – участок с оторванными гофрами при искусственном отрыве крышки от шторы; 3 – непроклеенные участки; 4 – деформация бумажных фильтроэлементов

На наш взгляд, это результат возросшего давления в системе смазки до предельных величин.

Центробежный масляный фильтр (центрифуга) не допускает подобного явления. При работе дизельных двигателей на классических маслах шламовые отложения в роторе имеют желеобразный характер толщиной 10–15 мм в зависимости от наработки (рис. 2).

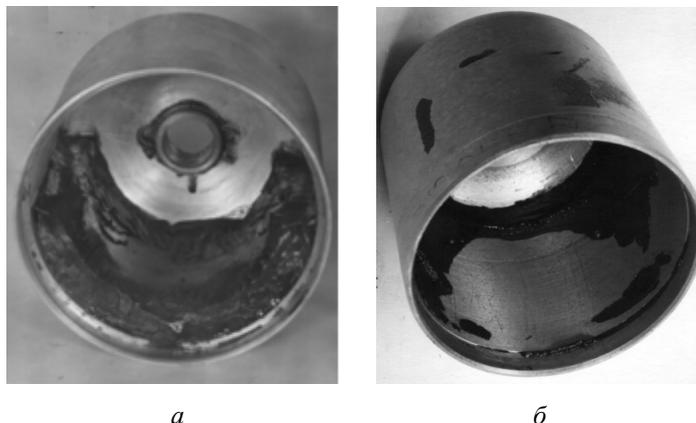


Рис. 2. Состояние внутренней поверхности ротора центрифуг с отложениями: а – КамАЗ-740 (наработка 7800 км); б – Scania G500XT (наработка 12 000 км)

Несвоевременное техобслуживание системы приводит к смыву отложений из ротора в картер ДВС (рис. 3).

В ранее выполненных работах [9–14] было показано, что между концентрацией негорючих механических примесей в работающем масле и износом железосодержащих деталей существует тесная корреляционная связь ($r = 0,85–0,87$) в виде $Fe = f(ИП)$. В настоящей работе этот процесс представлен математическими моделями на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что в зоне малых концентраций негорючие примеси на процесс изнашивания деталей заметного влияния не оказывают, независимо от марки масла. В этой зоне частицы загрязнения носят низкодисперсный характер, соизмеримый с толщиной масляной плёнки на трущихся поверхностях сопряженных деталей. Содержание износа железа выше

браковочной нормы [15] и резко возрастает при НП больше 0,1 %. Работа двигателей на масле SAE в 2 раза снижает износ.



Рис. 3. Вид шламовых отложений в роторе центрифуги КамАЗ, отработавшего 8000 км на смешанном масле: 85 % М10Г₂К + 15 % SAE 5W-40

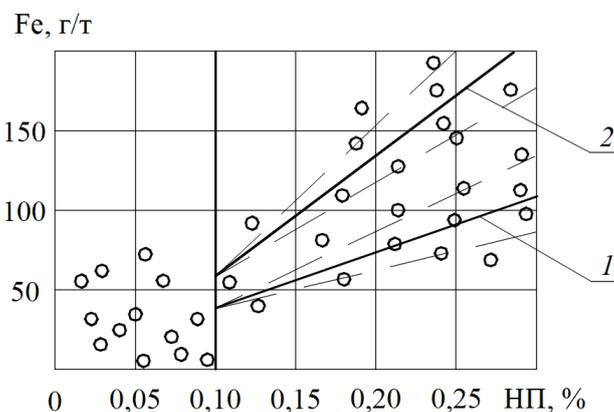


Рис. 4. Характер связи содержания износного железа (Fe) от негорючей составляющей механических примесей (НП) в моторном масле дизельных двигателей КамАЗ без центрифуги: 1 – $Fe = 0,32 \cdot 10^3 НП + 1,3$ ($r = 0,87$) – SAE 5W-40; 2 – $Fe = 0,64 \cdot 10^3 НП + 2,7$ ($r = 0,85$) – М10Г₂К; - - - линия ограничения зоны дисперсии

Учитывая, что подшипники коленчатого вала высоконагруженных дизельных двигателей состоят из стального основания с алюминиевым слоем, покрытым сплавом свинца и меди, в настоящей работе получены результаты их износа в зависимости от концентрации кремния в масле как продукта загрязнения (табл. 2).

Из данных табл. 2 следует, что процесс абразивного изнашивания подшипников имеет линейную зависимость при достаточной тесноте связи между элементами. При этом работа дизельных двигателей с центрифугой на минеральном масле увеличивает рост износных элементов в масле в 1,2–4,0 раза по сравнению с синтетическим, тогда как без центрифуги – в 1,5–5,0 раза. Смешивание масел приводит к их росту на порядок.

Для комплексной оценки влияния показателей качества масла на износ железосодержащих деталей рассчитаны трёхфакторные модели, имеющие следующий вид.

При работе на классическом масле М10Г₂К с показателями Si = 18–20 г/т, ЩЧ = 7–16 мгКОН/г и $\eta = 8$ –14 сСт:

$$Fe = 6,46 + 2,42 Si - 2,75 ЩЧ + 0,72 \eta.$$

Таблица 2

Среднестатистические балансовые уравнения загрязнения и износа подшипников коленчатого вала дизельных двигателей КамАЗ

| Наличие центрифуги в ДВС | Марка масла | Динамика процесса загрязнения | | Модель абразивного изнашивания | | | |
|--------------------------|---------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| | | $S_i = f(L)$ | | $P_b = f(S_i)$ | | $C_u = f(S_i)$ | |
| | | Вид зависимости | Теснота связи, r | Вид зависимости | Теснота связи, r | Вид зависимости | Теснота связи, r |
| есть | M10Г ₂ К | $0,71L + 0,92$ | 0,72 | $0,92S_i + 0,75$ | 0,75 | $0,18S_i + 0,15$ | 0,67 |
| | SAE 5W-40 | $0,17L + 0,37$ | 0,91 | $0,22S_i + 0,40$ | 0,64 | $0,15S_i + 0,25$ | 0,80 |
| | Смесь | $0,83L + 1,84$ | 0,84 | $1,85S_i + 0,51$ | 0,67 | $0,37S_i + 0,36$ | 0,77 |
| нет | M10Г ₂ К | $3,15L + 3,68$ | 0,81 | $2,42S_i + 1,00$ | 0,72 | $0,63S_i + 0,22$ | 0,84 |
| | SAE 5W-40 | $0,91L + 2,14$ | 0,92 | $0,74S_i + 0,20$ | 0,66 | $0,46S_i + 0,37$ | 0,78 |
| | Смесь | $4,86L + 4,58$ | 0,78 | $2,44S_i + 0,90$ | 0,75 | $1,74S_i + 0,81$ | 0,90 |
| Повышение, кол-во раз | | 1,6; 5,0; 5,5 | – | 1,32; 3,36; 1,32 | – | 2,4; 3,0; 4,7 | – |

При смешивании масел в пропорции, указанной на рис. 3, с показателями $S_i = 22–25$ г/т, ЩЧ = 5–7 мг КОН/г и $\eta = 9–15$ сСт:

$$Fe = 9,15 + 3,04 S_i - 0,86 \text{ ЩЧ} + 1,14 \eta.$$

Очевидно, при добавлении в минеральное масло 15 % полусинтетического, т. е. 3–5 %, износ железосодержащих деталей дизельных двигателей (а это в основном детали ЦПГ) может увеличиться до 110–115 г/т и выше, что снижает их долговечность в 2,5–3 раза.

Заключение

Таким образом, представленные результаты исследования системы «ДВС – масло» дизельных двигателей КамАЗ свидетельствуют о целесообразности применения масляных центрифуг независимо от марки масел, что способствует повышению эксплуатационного ресурса их деталей и масляных фильтров тонкой очистки.

С целью сохранения долговечности, заложенной в ДВС при изготовлении, авторы рекомендуют следующее:

1. При подготовке водителей и инженерно-технических кадров, занятых эксплуатацией и автосервисом автомобилей, им необходимо давать сведения о химмотологии в краткой, доступной форме.
2. Для предотвращения смешивания моторных масел на транспортных предприятиях с разномарочным парком автомобилей целесообразно у заливной горловины на видном месте разместить бирку с указанием марки масла, рекомендуемой заводом-изготовителем.

Список литературы

1. О чистоте моторных масел в дизелях автотранспортных средств / В.Д. Исаенко [и др.] // Современные проблемы машиностроения: материалы XV Международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2022. – С. 321–322.
2. Оценка влияния моторного масла на надежность дизелей / В.Д. Исаенко [и др.] // Прогрессивные технологии в транспортных системах: Евразийское сотрудничество: материалы XVII Международной научно-практической конференции. – Оренбург: Изд-во ОГУ, 2022. – С. 238–244.
3. К вопросу выбора смазочного масла для двигателей КамАЗ / В.А. Аметов [и др.] // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2018. – № 3 (61). – С. 186–191.
4. Исаенко В.Д., Исаенко П.В., Исаенко А.В. К обоснованию выбора моторных масел для дизелей // Современные проблемы машиностроения: материалы XIV Международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2021. – С. 314–316.

5. Мачехин Н.Ю., Корнеев С.В. Влияние конструкции дизельных двигателей КАМАЗ на изменение показателей работоспособности моторных масел // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы VIII Международной научно-технической конференции. – Омск: Изд-во ВИ, 2018. – С. 22–23.
6. Алгоритм выбора моторных масел для техники. / Н.Ю. Мачехин [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2019. – № 7. – С. 22–25.
7. Мачехин Н.Ю., Ширлин И.И., Пашукевич С.В. Особенности эксплуатации техники при использовании высококачественных моторных масел с увеличенными интервалами замены // Вестник СибАДИ. – 2019. – № 4. – Т. 16. – С. 446–454.
8. Анализ динамики изменения характеристик работоспособности синтетического моторного масла при увеличенных интервалах замены / С.В. Корнеев в [и др.] // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы XI Международной научно-технической конференции. – Омск: Изд-во ОГТУ, 2021. – С. 19–20.
9. Vehicular engine oil service life characterization using On-Board Diagnostic (OBD) sensor data SENSORS / J. Siegel [et al.] // IEEE Sensors Journal. – 2014. – P. 1722–1725.
10. Fault diagnosis of engine lubrication system / R. Avinash Pawashe [et al.] // Circuits and Systems (ICMDCS): International conference on Microelectronic Devices. – 2017. – P. 1–6.
11. Mathematical analysis of soot particles in oil used as system state indicator / D. Valis [et al.] // IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). – 2016. – P. 486–490.
12. Kardoš S., Pietriková A., Tóthová J. Possibilities of motor oil continuous diagnostics // 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). – 2015. – P. 277–282.
13. Vališ D., Žák L. Oil additives used as indicator and input for preventive maintenance optimization / International Conference on Military Technologies (ICMT). – 2015. – P. 1–6.
14. Pai P., Rao B. Artificial neural network based prediction of performance and emission 602 characteristics of a variable compression ratio CI engine using WCO as a biodiesel at different injection 603 timings // Applied Energy. – 2011. – Vol. 88. – P. 2344–2354.
15. Energy saving and 605 pollution reduction by using green fuel blends in diesel engines / J.K. Mwangi [et al.] // Applied Energy. – 2015. – Vol. 159. – P. 214–236.

References

1. Isaenko V.D. [et al.]. O chistote motornyh masel v dizelyah avtotransportnyh sredstv [On the purity of motor oils in diesel engines of vehicles]. *Sovremennyye problemy mashinostroeniya: materialy XV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, Tomsk: TPU, 2022, pp. 321–322.
2. Isaenko V.D. [et al.]. Ocenka vliyanija motornogo masla na nadezhnost' dizelej [Assessing the influence of motor oil on the reliability of diesel engines]. *Progressivnyye tehnologii v transportnyh sistemah: Evrazijskoe sotrudnichestvo: materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, Orenburg: OGU, 2022, pp. 238–244.
3. Ametov V.A. [and others]. K voprosu vybora smazochnogo masla dlja dvigatelej KamAZ [On the issue of choosing lubricating oil for KamAZ engines]. *Uchenyye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*, 2018, no. 3 (61), pp. 186–191.
4. Isaenko V.D., Isaenko P.V., Isaenko A.V. K obosnovaniyu vybora motornyh masel dlja dizelej [To justify the choice of motor oils for diesel engines]. *Sovremennyye problemy mashinostroeniya: materialy XIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, Tomsk: TPU, 2021, pp. 314–316.
5. Machehin N.Ju., Korneev S.V. Vliyanie konstrukcii dizel'nyh dvigatelej KAMAZ na izmenenie pokazatelej rabotosposobnosti motornyh masel [Influence of the design of KAMAZ diesel engines on changes in performance indicators of motor oils]. *Tehnika i tehnologija neftehimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva: materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-technicheskoy konferencii*, Omsk: VI, 2018, pp. 22–23.
6. Machehin N.Ju. [and others]. Algoritm vybora motornyh masel dlja tehniki [Algorithm for selecting motor oils for equipment]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*, 2019, no. 7, pp. 22–25.
7. Machehin N.Ju., Shirilin I.I., Pashukevich S.V. Osobennosti jekspluatcii tehniki pri ispol'zovanii vysokokachestvennyh motornyh masel s uvelichennymi intervalami zameny [Peculiarities of equipment operation when using high-quality motor oils with extended replacement intervals]. *Vestnik SibADI*, 2019, no. 4, Vol. 16, pp. 446–454.
8. Korneev S.V. [and others]. Analiz dinamiki izmenenija harakteristik rabotosposobnosti sinteticheskogo motornogo masla pri uvelichennyh intervalah zameny [Analysis of the dynamics of changes in the performance characteristics of syn-

thetic motor oil at extended replacement intervals]. *Tehnika i tehnologija neftehimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva: materialy XI Mezhduнародnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*, Omsk: OGTU, 2021, pp. 19–20.

9. Siegel J. [et al.]. Vehicular engine oil service life characterization using On-Board Diagnostic (OBD) sensor data SENSORS. *IEEE Sensors Journal*, 2014, pp. 1722–1725.

10. Avinash Pawashe R. [et al.]. Fault diagnosis of engine lubrication system. *Circuits and Systems (ICMDCS): International conference on Microelectronic Devices*, 2017, pp. 1–6.

11. Valis D. [et al.]. Mathematical analysis of soot particles in oil used as system state indicator. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2016, pp. 486–490.

12. Kardoš S., Pietriková A., Tóthová J. Possibilities of motor oil continuous diagnostics. *38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 2015, pp. 277–282.

13. Vališ D., Žák L. Oil additives used as indicator and input for preventive maintenance optimization. *International Conference on Military Technologies (ICMT)*, 2015, pp. 1–6.

14. Pai P., Rao B. Artificial neural network based prediction of performance and emission 602 characteristics of a variable compression ratio CI engine using WCO as a biodiesel at different injection 603 timings. *Applied Energy*, 2011, Vol. 88, pp. 2344–2354.

15. Mwangi J.K. [et al.]. Energy saving and 605 pollution reduction by using green fuel blends in diesel engines. *Applied Energy*, 2015, Vol. 159, pp. 214–236.

Об авторах

Исаенко Виктор Дмитриевич (Томск, Российская Федерация) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры автомобильного транспорта и электротехники Томского государственного архитектурно-строительного университета (Российская Федерация, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, e-mail: 3154@70.ru).

Исаенко Алексей Викторович (Томск, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта и электротехники Томского государственного архитектурно-строительного университета (Российская Федерация, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, e-mail: vip.seductor@mail.ru).

Исаенко Павел Викторович (Томск, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта и электротехники Томского государственного архитектурно-строительного университета (Российская Федерация, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, e-mail: isaenko_pv@mail.ru).

About the authors

Viktor D. Isaenko (Tomsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, senior researcher, Associate Professor of the Department of road transport and electrical engineering, Tomsk State University of Architecture and Building (2, Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russian Federation, e-mail: 3154@70.ru).

Alexey V. Isaenko (Tomsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of road transport and electrical engineering, Tomsk State University of Architecture and Building (2, Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russian Federation, e-mail: vip.seductor@mail.ru).

Pavel V. Isaenko (Tomsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of road transport and electrical engineering, Tomsk State University of Architecture and Building (2, Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russian Federation, e-mail: isaenko_pv@mail.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора равноценен.

Поступила: 29.09.2023

Одобрена: 10.10.2023

Принята к публикации: 01.10.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Исаенко, В.Д. Масло в двигателе должно быть чистым / В.Д. Исаенко, А.В. Исаенко, П.В. Исаенко // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. – 2023. – № 4. – С. 54–61. DOI: 10.15593/24111678/2023.04.05

Please cite this article in English as: Isaenko V.D., Isaenko A.V., Isaenko P.V. The engine oil must be clean. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2023, no. 4, pp. 54–61. DOI: 10.15593/24111678/2023.04.05