Сведения об авторах**Принадлежность к организации**

Князева Лариса Геннадьевна – доктор химических наук, доцент, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: Knyazeva27@mail.ru.

Дорохов Андрей Валерьевич – младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: dorokhov.andryusha@mail.ru.

Курьято Николай Алексеевич – лаборант-исследователь Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: cskasparta@yandex.ru.

Author credentials**Affiliations**

Knyazeva Larisa G. – Full Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: Knyazeva27@mail.ru.

Dorokhov Andrey V. – Junior Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: dorokhov.andryusha@mail.ru.

Kuryato Nikolay A – Research laboratory assistant of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: cskasparta@yandex.ru.

*Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 18-16-00006
This work was supported by RNF, project No. 18-16-00006*

Поступила в редакцию (Received): 20.07.2020 Принята к публикации (Accepted): 21.08.2020

УДК 621.822.6.004.67:668.3:631.3.02
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-4-76-84

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

¹Ли Роман Иннакентьевич

¹Киба Мария Романовна

¹Быконя Андрей Николаевич

¹ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Реферат. Увеличение долговечности подшипников качения автомобилей позволяет снизить затраты на ремонт техники и увеличить время безотказной работы. Большое распространение получил метод восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях автомобилей нанесением покрытий из раствора эластомера. Установлено, что наличие слоя полимерного нанокompозита в посадочном отверстии приводит к перераспределению нагрузки с центрального, наиболее нагруженного тела качения на соседние с ним за счет деформации кольца подшипника, увеличивается площадь пятна контакта нагруженных тел с дорожками качения из-за большей деформации поверхности дорожек качения в подшипниках с покрытием из полимерного нанокompозита в сравнении со стандартным подшипником. Это приводит к снижению контактных напряжений и увеличивается ресурс подшипников. Предложена оригинальная методология исследования трибологических параметров и контактных напряжений в подшипниках качения и конструкция стенда для проведения вышеупомянутых

исследований. Методология включает исследование коэффициента постели, коэффициента Кирхгофа, построение тарифовочного графика зависимости площади пятна контакта нагруженного тела с дорожкой качения от радиальной нагрузки, исследование распределения нагрузки и контактных напряжений между телами качения при радиальном нагружении подшипника с полимерным покрытием. Приведены результаты исследования контактных напряжений в подшипниках с посадками, восстановленными полимерным наноккомпозитом. Проведенные экспериментальные исследования показывают корректность разработанной методологии исследования трибологических параметров и контактных напряжений в подшипниках качения.

Ключевые слова: подшипник, контакт, нагрузка, площадь, напряжение, долговечность, полимерный наноккомпозит.

RESEARCH OF TRIBOLOGICAL PARAMETERS AND CONTACT STRESSES IN CAR ROLLING BEARINGS

¹Lee Roman

¹Kiba Maria

¹Bykonya Andrew

¹FSBEI HE "Lipetsk State Technical University"

Abstract. Increasing the durability of rolling bearings of automobiles allows reducing the cost of repairing equipment and increasing the uptime. The method of restoring worn-out landing holes in car body parts by applying coatings from an elastomer solution is widely used. It has been established that the presence of a polymer nanocomposite layer in the bore hole leads to a redistribution of the load from the central, most loaded rolling element to its adjacent due to deformation of the bearing ring, the contact area of the loaded bodies with the raceways increases due to greater deformation of the surface of the raceways in the bearings coated with a polymer nanocomposite in comparison with a standard bearing. This reduces contact stresses and increases bearing life. An original methodology for the study of tribological parameters and contact stresses in rolling bearings and a bench design for the aforementioned studies are proposed. The methodology includes the study of the bed coefficient, the Kirchhoff coefficient, the construction of a calibration graph of the dependence of the contact area of the loaded body with the raceway on the radial load, the study of the load distribution and contact stresses between the rolling bodies under radial loading of a polymer-coated bearing. The results of a study of contact stresses in bearings with seats reduced by a polymer nanocomposite are presented. The conducted experimental studies show the correctness of the developed methodology for the study of tribological parameters and contact stresses in rolling bearings.

Keywords: bearing, contact, load, area, stresses, longevity, bearing, polymeric nanocomposite.

Введение. Долговечность подшипников качения в значительной мере определяется напряжениями в зоне контакта нагруженных тел с дорожками качения. Ресурс деталей подшипника L при работе в условиях точечного контакта (радиальный шарикоподшипник) обратно пропорционален максимальному контактному давлению σ_0 [1]

$$L \approx \frac{1}{\sigma_0^9}. \quad (1)$$

Как следует из формулы (1) незначительное снижение контактного напряжения существенно увеличит ресурс деталей и соответственно подшипника качения. При восстановлении изношенных посадочных отверстий подшипников качения в корпусных деталях полимерными материалами достигается многократное увеличение ресурса подшипников. Причины следующие: 1) перераспределение нагрузки с центрального, наиболее нагруженного на соседние боковые тела качения благодаря деформации кольца подшипника с полимерным покрытием; 2) увеличение площади пятна контакта нагруженных тел с дорожками качения из-за большей деформации поверхности дорожек качения в подшипниках с полимерным покрытием в сравнении со стандартным подшипником [2 – 3]. Поэтому исследования трибологических параметров и контактных напряжений в подшипниках качения с полимерным покрытием являются

актуальными, так как позволят разработать технические решения, направленные на увеличение ресурса подшипниковых узлов при восстановлении.

Цель исследований. В Липецком государственном техническом университете разработан стенд оригинальной конструкции для исследования контактных напряжений и долговечности подшипниковых узлов автомобилей [4]. Радикальные изменения конструкции стенда привели к необходимости разработки оригинальной методологии исследования трибологических параметров, контактных напряжений и долговечности подшипников качения. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90227\19.

Результаты и их обсуждение. Методология включает исследование коэффициента постели K , коэффициента Кирхгофа η построение тарировочного графика зависимости площади пятна контакта нагруженного тела с дорожкой качения S от радиальной нагрузки P , исследование распределения нагрузки и контактных напряжений между телами качения при радиальном нагружении подшипника с полимерным покрытием.

Стенд для испытания подшипников качения на долговечность при статическом нагружении (рисунок 1) включает ручной гидравлический насос 1, создающий давление в масляной магистрали, который сообщается с помощью гидравлических шлангов 2 и трубопроводов с двумя радиальными и одним осевым узлами нагружения.

Рисунок 1 – Стенд для испытания подшипников качения на долговечность при статическом нагружении [4]

Радиальный узел нагружения состоит из двухходового крана 3, контрольного манометра 6, регистрирующего радиальную нагрузку на подшипник, гидроцилиндра 4, крепящегося болтами к основанию опорной пластины 8, установленной на раме стенда 11, нагрузочной вилки 5, обеспечивающей передачу нагрузки от штока гидроцилиндра на вспомогательный подшипник 7, вал и испытываемый подшипник в шите 10 асинхронного электродвигателя 9.

Осевой узел нагружения состоит из двухходового крана 3, контрольного манометра 6, регистрирующего осевую нагрузку на подшипник, гидроцилиндра 4, крепящегося болтами к вертикальному кронштейну опорной пластины 8, корпуса с упорным подшипником и упорной втулки, обеспечивающих осевую нагрузку вал и испытываемый подшипник.

Для исследования коэффициента постели K , коэффициента податливости упругого основания

k_n , коэффициента Кирхгофа η , построения тарифовочного графика зависимости площади пятна контакта нагруженного тела с дорожкой качения S от радиальной нагрузки P демонтировали опорную пластину 8 и установленное на ней оборудование. На опорную раму стенда установили монтажный стол на четырех опорных стойках. На монтажный стол при помощи болтов закрепили гидроцилиндр, который соединили с ручным гидравлическим насосом с помощью гидравлических шлангов и трубопроводов, с двухходовым краном и контрольным манометром, регистрирующим радиальную нагрузку на штоке гидроцилиндра. Разработана и изготовлена нагрузочная вилка (рис. 2). Нагрузочная вилка при помощи резьбы заворачивается в резьбовое отверстие в штоке гидроцилиндра. Нагрузка от гидроцилиндра на шарик передается нагрузочной пластиной 1. Нагрузочная пластина имеет сферическое углубление, в котором размещается и фиксируется шарик.

Поверочная плита 2-1-250×250 ГОСТ 10905-75 опирается на раму стенда. На плиту устанавливают исследуемую металлическую пластину с полимерным покрытием, которое будет сопрягаться с поверочной плитой. На металлическую поверхность пластины укладывают полосу копировальной бумаги марки МВ-16 ГОСТ 489-88. Шарик при радиальном нагружении взаимодействует с металлической поверхностью пластины и оставляет отпечаток пятна контакта на копировальной бумаге. Измерения пятна контакта осуществляют с помощью микроскопа МПБ-2, который имеет цену деления 0,05 мм и обеспечивает 24-х кратное увеличение.

Коэффициент Кирхгофа η рассчитывают по формуле

$$\eta = \frac{D_{\text{пк}}^3}{3PD_{\text{ш}}}, \quad (2)$$

где $D_{\text{пк}}$ – диаметр пятна контакта, мм; P – нагрузка шарик, Н; $D_{\text{ш}}$ – диаметр шарика.

Для исследования коэффициента постели K , при нагружении шариком пластины, проводят измерение деформации последней с помощью измерительной головки 1МИГ с ценой деления 0,001 мм, которая закреплена на штативе. Повторность измерений трехкратная.

Рисунок 2 – Нагрузочная вилка

Коэффициент постели K определяют по выражению:

$$K = 4\beta^4 EJ, \quad (3)$$

где β – коэффициент, рассчитываемый по формуле $\beta = \sqrt[3]{\frac{P}{8EJu_0}}$; E – модуль упругости материала,

для стали $E = 2,15 \times 10^5 \text{ Н/мм}^2$; P – нагрузка на шарик, Н; u_0 – деформация металлической пластины с полимерным покрытием под действием нагрузки, создаваемой шариком, мм.

Коэффициент податливости k_n рассчитывают по зависимости

$$k_n = \frac{K}{b}, \quad (4)$$

где K – коэффициент постели упругого основания; b – ширина пластины.

Для получения тарировочного графика нагрузочную вилку разбирают. Между нагрузочной пластиной 1 и пластиной 3 установлены втулки 2 квадратного сечения, которые формируют окно прямоугольного сечения, в котором размещают наружное кольцо подшипника с полимерным покрытием. Затем нагрузочную пластину пропускают через отверстие кольца подшипника и соединяют ее с втулками 2 посредством шпилек 4 и гаек 5 (рис. 2). Кольцо подшипника с полимерным покрытием опирают на поверочную плиту. В сферическое углубление нагрузочной пластины устанавливают шарик, который контактирует с копировальной бумагой, уложенной на беговую дорожку наружного кольца подшипника. Нагрузку на подшипник регистрируют манометром. После снятия нагрузки микроскопом МПБ-2 измеряют полуоси эллипса пятна контакта. В завершении строят график зависимости площади пятна контакта от нагрузки на шарик.

При исследовании распределения нагрузки и контактных напряжений между телами качения при радиальном нагружении подшипника с полимерным покрытием используют стенд (рисунок 1). Перед экспериментом из сепаратора испытываемого подшипника удаляют три шарика, которые в не нагруженной зоне. На поверхность беговой дорожки напротив центрального, первых и вторых боковых тел качения укладывают полосу копировальной бумаги. Радиальным узлом нагружения создают нагрузку на испытываемый подшипник, которую выдерживают в течение 0,25 ч. Затем нагрузку снимают и микроскопом МПБ-2 измеряют полуоси эллипса пятна контакта. Используя тарировочный график, определяют нагрузку на тела качения.

Контактные напряжения рассчитывают по известной формуле

$$\sigma = \frac{P}{S}, \quad (5)$$

где S – площадь пятна контакта.

На рисунке 3 показано изменение коэффициента Кирхгофа η при различной толщине h полимерного покрытия из нанокompозита эластомера Ф-40.

Рисунок 3 – Изменение коэффициента Кирхгофа η при различной толщине h полимерного покрытия из нанокompозита эластомера Ф-40

Параметр η увеличивается с ростом толщины полимерного покрытия h . Зависимость линейная. Параметр η имеет минимальное значение $\eta = 3,18 \times 10^{-5} \text{ мм}^2/\text{Н}$ на самом тонком покрытии $h = 0,075$ мм. Однако в сравнении с парой сталь-сталь ($0,85 \times 10^{-5} \text{ мм}^2/\text{Н}$) этот параметр в 3,74 раза больше.

С ростом толщины полимерного покрытия $h = 0,10$; $0,125$ и $0,15$ мм параметр η увеличивается до значений 3,64; 5,24 и $8,14 \times 10^{-5} \text{ мм}^2/\text{Н}$. В сравнении с парой сталь-сталь параметр η больше в 4,28; 6,16 и 9,58 раза.

На рисунке 4 показано изменение коэффициента податливости k_n при различной толщине h полимерной подложки из нанокompозита.

Рисунок 4 – Изменение коэффициента податливости k_n при различной толщине h полимерной подложки из нанокompозита Ф-40

Параметр k_n показывает максимальное значение $k_n = 65,75 \text{ Н/мм}^2$ при минимальной толщине полимерного покрытия $h = 0,075$ мм. Таким образом, чтобы деформировать пластину с полимерным покрытием толщиной $h = 0,075$ мм на единицу длины требуется приложить максимальную силу. При большей толщине полимерного покрытия $h = 0,1$ мм параметр k_n уменьшился до $55,14 \text{ Н/мм}^2$, т.е. жесткость пластины с полимерным покрытием снизилась. Для пластины с максимальной толщиной полимерного покрытия $h = 0,125$ мм параметр k_n имеет минимальное значение $k_n = 45,39 \text{ Н/мм}^2$, поэтому жесткость такой пластины с полимерным покрытием наименьшая.

Зависимость $k_n = f(h)$ линейная. По сравнению с ненаполненным эластомером Ф-40 коэффициент податливости упругого основания в нанокompозите увеличился от 1,29 ($35,18$ и $45,39 \text{ Н/мм}^2$) до 1,37 раз ($47,95$ и $65,75 \text{ Н/мм}^2$).

Каким образом радиальная нагрузка распределяется между телами качения в стандартном подшипнике 205 и подшипнике 205 с посадкой из нанокompозита Ф-40 показано на рисунке 5. Зависимости 1, 2, 3 получены расчетным путем по методике [5] для подшипника 205 с нормальным радиальным и нулевым зазорами посадки.

Зависимости 1', 2' и 3' получены экспериментальным путем. Благодаря полимерному покрытию при радиальной нагрузке $P = 3479 \text{ Н}$ нагруженность центрального тела в подшипнике с покрытием Ф-40 уменьшилась на 18 %.

При радиальной нагрузке $P = 10437 \text{ Н}$ снижение нагрузки на центральное тело качения составляет 17 %. При этом увеличивается нагруженность первых боковых тел качения. В случае с радиальной нагрузкой при $P = 3479 \text{ Н}$ в подшипнике с покрытием нанокompозита на 12 %. При большей нагрузке $P = 10437 \text{ Н}$ нагруженность первых боковых тел качения возрастает до 11 %.

Рисунок 5 – Нагруженность тел качения в стандартном подшипнике 205 и в подшипнике 205 с посадкой, восстановленной нанокompозитом Ф-40: 0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения; 1, 2, 3 – нагруженность тел в стандартном подшипнике под радиальной нагрузкой 3479; 6958 и 10437 Н, соответственно; 1', 2', 3' – нагруженность тел в подшипнике с полимерным покрытием

В подшипнике с полимерной посадкой имеет место увеличение угла зоны нагружения и по этой причине часть радиальной нагрузки на подшипник воспринимается вторыми боковыми телами качения. В подшипнике, нагруженном нагрузкой $P = 3479$ Н, вторые боковые тела качения, в подшипнике с посадкой нанокompозита воспринимают нагрузку в 140 Н. Увеличение нагрузки до $P = 10437$ Н повышает нагруженность вышеупомянутых тел качения до 419 Н.

Наличие полимерной подложки подшипника увеличивает при радиальном нагружении деформацию желоба наружного кольца.

По этой причине площадь пятна контакта тел с дорожкой качения наружного кольца в подшипнике 205 с посадкой нанокompозита до 1,7 раз больше, в отличие от стандартного подшипника.

Повышенные значения коэффициента распределения нагрузки и площади пятна контакта значительно снижают контактные напряжения в подшипнике 205 с посадкой из нанокompозита в 1,8 раз (рисунок 6).

Под радиальной нагрузкой $P = 3479$ Н напряжение, в отличие от стандартного подшипника снизилось в зоне контакта центрального тела с желобом в подшипнике с посадкой нанокompозита в 1,76 раза.

В случае нагружения подшипника до $P = 10437$ Н контактное напряжение понизилось в подшипнике с покрытием нанокompозита в 1,73 раза.

Несмотря на увеличение нагруженности первых боковых тел, благодаря большей деформации желоба наружного кольца, произошло значительное увеличение площади пятна контакта.

В итоге, в отличие от стандартного подшипника, контактные напряжения значительно меньше. При нагрузке $P = 3479$ Н напряжение в подшипнике с покрытием нанокompозита ниже в 1,5 раза. Под радиальной нагрузкой на подшипник $P = 10437$ Н контактные напряжения уменьшились в подшипнике с покрытием нанокompозита в 1,49 раза.

Контактные напряжения в зоне вторых тел качения составили 518 и 582 Н/мм² при нагрузках соответственно 3479 и 10437 Н.

Рисунок 6 – Контактные напряжения σ в стандартном подшипнике 205 и в подшипнике 205 с посадкой восстановленной нанокомпозитом Ф-40: 0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения; 1, 2, 3 – напряжения в стандартном подшипнике под радиальной нагрузкой 3479; 6958 и 10437Н; 1', 2', 3' – напряжения в подшипнике с полимерным слоем толщиной 0,15 мм при $P = 3479$; 6958 и 10437Н

Выводы. 1. Разработана оригинальная методология исследования трибологических параметров и контактных напряжений в подшипниках качения.

2. Проведенные экспериментальные исследования показали корректность разработанной методологии и перспективность восстановления посадок подшипников полимерным нанокомпозитом на основе эластомера Ф-40, что обеспечивает снижение контактных напряжений в подшипниках и увеличивает их ресурс.

Список литературы

1. Справочник по триботехнике: В 3 т. Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / М. Хебда, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
2. Ли Р.И. Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами: дис ... докт. техн. наук. – М., 2001, – 340 с.
3. Курчаткин В.В. Восстановление посадок подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами: дис ... докт. техн. наук. / В.В.Курчаткин. – М., 1989, – 407 с.
4. Ли Р.И., Псарев Д.Н., Ризаева Ю.Н., Пчельников А.В., Быконя А.Н., Мельников А.Ю. Стенд для испытания подшипников качения на долговечность [Текст]: Патент на изобретение РФ № 2719624. Заявл. 08.07.2019. // Оpubл. 21.04.2020. – Бюл. №12.
5. Перель Л.Я. Подшипники качения. Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник [Текст] / Л.Я.Перель. – М.: Машиностроение, 1983. – 543 с.

References

1. Spravochnik po tribotekhnike: V 3 t. T. 2: Smazochnye materialy, tehnika smazki, opory skol'zhenija i kachenija / M. Hebda, A.V. Chichinadze. – M.: Mashinostroyeniye, 1990. – 416 s.
2. Li R.I. Vosstanovleniye nepodviznykh soedineniy podshipnikov kachenija sel'skhozajstvennoj tekhniki polimernymi materialami: dis ... dokt. tehn. nauk. – M., 2001, – 340 s.
3. Kurchatkin V.V. Vosstanovleniye posadok podshipnikov kachenija sel'skhozajstvennoj tekhniki polimernymi materialami: dis ... dok. tehn. nauk. / V.V.Kurchatkin. – M., 1989, – 407 s.

4. Li R.I., Psarev D.N., Rizaeva Ju.N., Pchel'nikov A.V., Bykonja A.N., Mel'nikov A.Ju. Stend dlja ispytaniya podshipnikov kachenija na dolgovechnost' [Tekst]: Patent na izobretenie RF № 2719624. Zajavl. 08.07.2019. // Opubl. 21.04.2020. – Bjul. №12.

5. Perel' L.Ja. Podshipniki kachenija. Raschet, proektirovanie i obsluzhivanie opor: Spravochnik [Tekst] / L.Ja.Perel'. – M.: Mashinostroenie, 1983. – 543 s.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Ли Роман Иннакентьевич – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: romanlee@list.ru.

Киба Мария Романовна – аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: damsel_91@mail.ru.

Быконя Андрей Николаевич – аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: loseroff@mail.ru.

Author credentials

Affiliations

Lee Roman – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Lipetsk State Technical University”, e-mail: romanlee@list.ru.

Kiba Maria – post-graduate student of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Lipetsk State Technical University”, e-mail: damsel_91@mail.ru.

Bykonya Andrew – post-graduate student of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Lipetsk State Technical University”, e-mail: loseroff@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 23.06.2020 Принята к публикации (Accepted): 17.08.2020

УДК 621.892

DOI: 10.35887/2305-2538-2020-4-84-89

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫВКИ СИСТЕМЫ СМАЗКИ ДВС ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

¹Остриков Валерий Васильевич

²Vigdorowitsch Michael

¹Жерновников Дмитрий Николаевич

¹Кошелев Александр Викторович

¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

²Angara GmbH

Реферат. Работа двигателей тракторов сопряжена с высокими нагрузками и значительными температурными режимами. В смазочном моторном масле и на деталях двигателя, в зависимости от наработки двигателя, накапливается значительное количество загрязнений, смол, продуктов окисления, которые осаждаются в масляных каналах системы смазки, на поршнях, под маслосъёмными кольцами. Для удаления загрязнений из системы смазки, при проведении операции технического обслуживания используются специальные промывочные масла. Одним из принятых, достаточно простых способов определения качества промывки системы смазки в двигателях тракторов является визуальный анализ изменения цвета промывочного масла от светлого жёлтого до чёрного. Детальный анализ работ, посвящённых оценке изменения цвета промывочного масла в динамике отсутствует, не установлены критериальные характеристики, определяющие взаимосвязь изменения цвета масла и эксплуатационные показатели двигателя. На основании результатов экспериментальных исследований по промывке системы смазки двигателей тракторов получены зависимости