

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МАСЛА НА ОСНОВЕ ЕГО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Е.Р. Вернигора¹, В.А. Иванников², С.Н. Крухмалев³, А.Е. Матяшов⁴, Г.В. Середин⁵
^{1, 2, 3, 4, 5} Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
г. Воронеж, Россия
¹vernigora.egor@inbox.ru

Аннотация. Гидравлические масла играют ключевую роль в функционировании гидравлических систем, передавая энергию и обеспечивая смазку и охлаждение движущихся частей и компонентов. Как и другие жидкости, они подвержены различным видам износа и деградации, что может вызвать необходимость замены масла или ремонта техники. Для оценки технического состояния гидравлических масел широко применяется термографический анализ, который позволяет быстро и достаточно точно определять состояние характеристик масла.

Ключевые слова. Гидропривод, гидравлическое масло, механические примеси, окисление, температура, тепловая диагностика.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSESSING THE CONDITION OF HYDRAULIC OIL BASED ON ITS THERMOPHYSICAL PROPERTIES

E.R. Vernigora¹, V.A. Ivannikov², S.N. Krukhmalev³, A.E. Matyashov⁴, and G.V. Seredin⁵
^{1, 2, 3, 4, 5} Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia
¹vernigora.egor@inbox.ru

Annotation. Hydraulic oils play a key role in the functioning of hydraulic systems, transferring energy and providing lubrication and cooling for moving parts and components. Like other fluids, they are subject to various types of wear and degradation, which can lead to the need for oil replacement or equipment repair. Thermographic analysis is widely used to assess the technical condition of hydraulic oils, allowing for quick and accurate determination of the oil's performance.

Keywords: Hydraulic drive, hydraulic oil, mechanical impurities, oxidation, temperature, and thermal diagnostics.

В настоящее время работа оборудования лесохозяйственных и лесозаготовительных машин обеспечивается гидроприводом. Эксплуатационные характеристики таких приводов во многом определяются состоянием гидравлических масел. В процессе работы гидропривода образуются продукты износа, попадающие в масло. С ростом рабочей температуры гидравлического масла и продолжительности его службы увеличивается степень окисления компонентов масла. В процессе окисления масла образуются большое количество лаков и шламов, которые оседают на стенках гидросистемы, ухудшая теплообмен. Эти факторы с ростом временем работы масла в гидроприводе существенно ухудшают его показатели, что приводит к нарушению рабочих процессов и выходу из строя элементов гидросистемы.

Традиционными способами борьбы с такими негативными явлениями являются организация фильтрации масел и их периодическая замена. Качественная фильтрация

гидравлического масла в приводе не решает всех проблем, так как устраняет только механические примеси, но не влияет на химические процессы, происходящие в масле. Кроме того, фильтрация усложняет и удорожает гидропривод и его техническое обслуживание, увеличивает потери энергии, снижая КПД гидропривода. Замена масла отработавшего масла новым производится в соответствии с регламентом завода-изготовителя. При этом определение фактического состояния гидравлического масла не производится. Отсюда возникает проблема досрочного достижения предельного состояния гидравлического масла по эксплуатационным показателям и как следствие ускоренный износ элементов гидропривода, что характерно для сложных и нагруженных режимов работы техники. Однако в случае облегченных условий работы техники возможна ситуация с неполной реализацией остаточного ресурса гидравлического масла, что при досрочной замене влечет экономические убытки. Таким образом, целью исследования является разработка методики оперативного контроля состояния гидравлического масла и критериев предельного состояния по косвенным диагностическим признакам.

Присутствие механических примесей в масле увеличивает его теплопроводность по сравнению с чистым маслом. Дополнительный фактор, влияющий на теплообменные характеристики, — это окисление масла, происходящее со временем. В ответ на это была предложена методика тепловой диагностики для оперативного контроля состояния гидравлического масла и эффективности работы гидросистемы.

Тепловая диагностика в гидросистемах лесозаготовительной техники осуществляется путем мониторинга термических показателей гидравлического масла на расстоянии. Этот метод позволяет выявлять аномалии, свидетельствующие о нарушениях в работе системы. [8]

Применение методов тепловой диагностики способствуют оценки состояние масла, обнаруживая степени окисления и загрязнения. Эта техника основывается на вариациях теплопроводности, зависящих от эксплуатационного периода гидравлического масла

Методика исследований.

Для проведения исследований был использован испытательный стенд КИ-4200 (рис. 1), используемый для диагностики гидроприводов. В ходе испытаний шестеренный насос НШ 46, функционировавший как гидронасос, работал на гидравлическом масле марки МГ-15-В. Стенд позволил смоделировать сложные условия, характерные для работы лесозаготовительной техники в летний период, такие как работа на лесозаготовке. [9]



Рисунок 1 – Стенд КИ-4200 для испытания гидроприводов
Figure 1 – Test stand for hydraulic actuators

Для испытаний выбрано семь образцов масла МГ-15-В с различным временем эксплуатации, варьирующимся от 0 до 4500 часов. Эксперименты были осуществлены на

испытательном стенде в условиях максимальных нагрузок, характерных для летней эксплуатации лесозаготовительной техники, когда температура масла в системе заметно повышается. В конструкцию стенда включены металлические катализаторы, моделирующие компоненты гидросистемы. Длительность тестирования каждого образца составляла 12 часов.

Основным показателем в исследовании, оценивающим уровень загрязнения масла, выступала его теплопроводность. В качестве базовой точки сравнения использовались свойства свежего масла, которое характеризуется значениями теплопроводности в пределах 0.115–0.135 Вт/(м·К) в температурном интервале от 20°C до 100°C. С увеличением времени эксплуатации масла отмечалось снижение его теплопроводности, что фиксировалось с помощью интегрированных в гидравлическую систему температурных датчиков.



Рисунок 2 – Датчик температуры
Figure 2 – Temperature sensor

Полученные данные о теплопроводности гидравлического масла при проведении эксперимента на различных пробах представлены на графике рис.3.

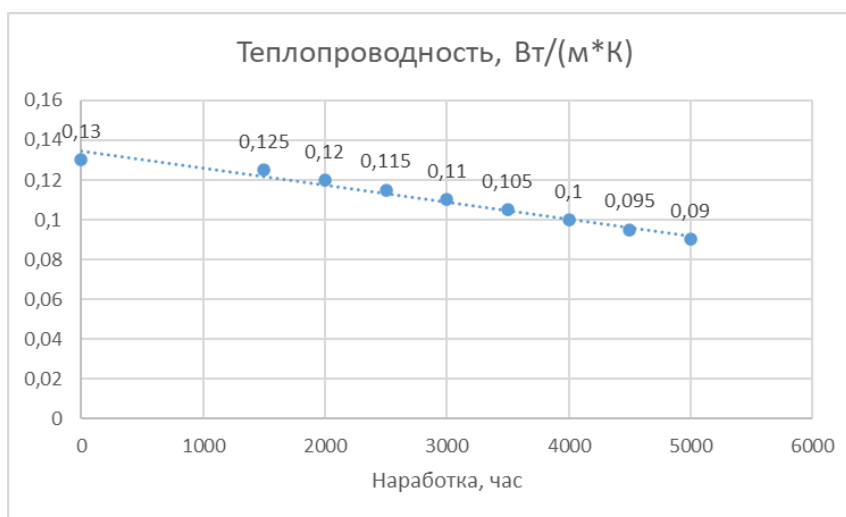


Рисунок 3-График зависимости теплопроводности гидравлического масла от его наработки
Figure 3-Graph of the dependence of the thermal conductivity of hydraulic oil on its operating time

Измеренные параметры температуры масла в гидравлическом оборудовании транслируются в устройство для сбора данных, после чего информация о температурном режиме в системе отправляется на мобильное устройство с установленным приложением для анализа теплопроводности [6]. Приложение использует метод Парохора [4] для

вычисления коэффициента теплопроводности; если полученное значение оказывается ниже нормы, пользователь получает уведомление о необходимости замены масла и диагностики гидросистемы.

Расчет теплопроводности по методу Парахора

Этап 1: Расчет базовых параметров

1. Параметры масла (справочные):

- Плотность при 15°C (ρ_0): 880 кг/м³
- Коэффициент теплового расширения (α): 0.00070 1/°C
- Молярная масса (усредненная): $M = 400$ г/моль
- Температура вспышки: 190°C
- $\lambda_{\text{эксп}} = 0,130 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, при $T = 40^\circ\text{C}$ (313 K)
- Масло: МГ-15-В (минеральное)

2. Расчет критической температуры:

$$T_{\text{всп}} = 190 + 273 = 463 \text{ K}$$

$$T_{\text{кип}} \approx T_{\text{всп}} + 100 = 563 \text{ K}$$

$$T_c \approx 1.41 * T_{\text{кип}} = 1.41 * 563 \approx 794 \text{ K}$$

3. Расчет плотности при 40°C:

$$\rho_{(40)} = \frac{880}{1 + 0,0007 * (40 - 15)} = \frac{880}{1,0175} \approx 865 \text{ кг/м}^3$$

Этап 2: Применение корреляции Сато-Ридела

Формула:

$$\lambda = \frac{1,11}{M^{\frac{1}{2}}} * (3 + 20 * (1 - T_r)^{\frac{2}{3}})$$

Для $T = 40^\circ\text{C}$ (313 K):

$$T_r = T/T_c = 313/794 \approx 0,394$$

$$M^{\frac{1}{2}} = 400^{\frac{1}{2}} = 20$$

$$1,11/20 = 0,0555$$

$$(1 - T_r) = 1 - 0,394 = 0,606$$

$$0,606^{\frac{2}{3}} \approx 0,721$$

$$20 * 0,721 = 14,42$$

$$3 + 14,42 = 17,42$$

$$\lambda_{\text{расч}} = 0,0555 * 17,42 \approx 0,967 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

Этап 3: Калибровка модели

Сравниваем с экспериментальным значением:

$$\lambda_{\text{расч}} = 0,967 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$\lambda_{\text{эксп}} = 0,130 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

Находим калибровочный коэффициент:

$$K = \lambda_{\text{эксп}} / \lambda_{\text{расч}} = 0,130 / 0,967 \approx 0,1344$$

Калиброванная формула:

$$\lambda_{\text{калибр}}(T) = K * \frac{1,11}{M^{\frac{1}{2}}} * (3 + 20 * (1 - T_r)^{\frac{2}{3}})$$

Этап 4: Расчет теплопроводности для других температур

Пример 1: $T = 20^{\circ}\text{C}$ (293 K)

$$\begin{aligned} T_r &= 293/794 \approx 0,369 \\ (1 - T_r) &= 0,631 \\ 0,631^{\frac{2}{3}} &\approx 0,739 \\ \lambda &= 0,0746 * (3 + 20 * 0,739) \approx 0,133 \text{ Вт/(м * К)} \end{aligned}$$

Пример 2: $T = 60^{\circ}\text{C}$ (333 K)

$$\begin{aligned} T_r &= 333/794 \approx 0,419 \\ (1 - T_r) &= 0,581 \\ 0,581^{\frac{2}{3}} &\approx 0,685 \\ \lambda &= 0,0746 * (3 + 20 * 0,685) \approx 0,125 \text{ Вт/(м * К)} \end{aligned}$$

Пример 3: $T = 80^{\circ}\text{C}$ (353 K)

$$\begin{aligned} T_r &= 353/794 \approx 0,445 \\ (1 - T_r) &= 0,555 \\ 0,555^{\frac{2}{3}} &\approx 0,655 \\ \lambda &= 0,0746 * (3 + 20 * 0,655) \approx 0,120 \text{ Вт/(м * К)} \end{aligned}$$

Пример 4: $T = 100^{\circ}\text{C}$ (373 K)

$$\begin{aligned} T_r &= 373/794 \approx 0,470 \\ (1 - T_r) &= 0,530 \\ 0,530^{\frac{2}{3}} &\approx 0,627 \\ \lambda &= 0,0746 * (3 + 20 * 0,627) \approx 0,116 \text{ Вт/(м * К)} \end{aligned}$$

Шаг 5: Анализ результатов представлен в табл. 1

Таблица 1 – Таблица результатов

Table 1 – Results table

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Приведенная темп. (T_r)	λ , Вт/(м·К)
0	0.369	0.133
40	0.394	0.130
60	0.419	0.125
80	0.445	0.120
100	0.470	0.116

Результаты исследования и обсуждение

Для подтверждение предложенной методики оперативного мониторинга качества гидравлического масла была выполнена серия лабораторных тестов [1-2]. Исследования базировались на анализе кинематической вязкости, оптической плотности и уровней загрязнителей в масле, см. рис. 5-7.

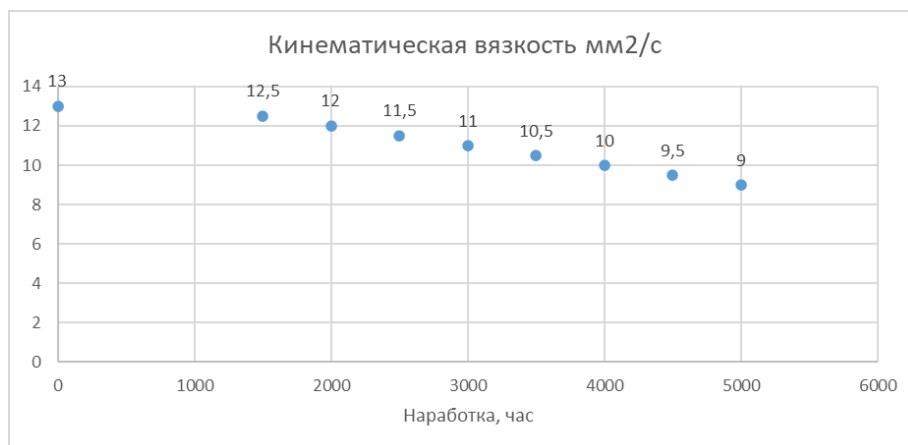


Рисунок 5-Кинематическая вязкость мм²/с
Figure 5-Kinematic viscosity mm²/s

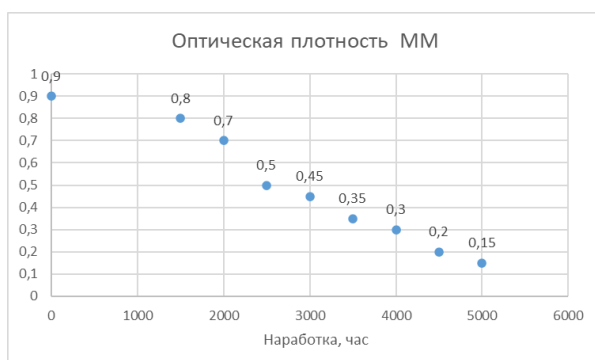


Рисунок 6-Оптическая плотность MM
Figure 6-Optical density of MM

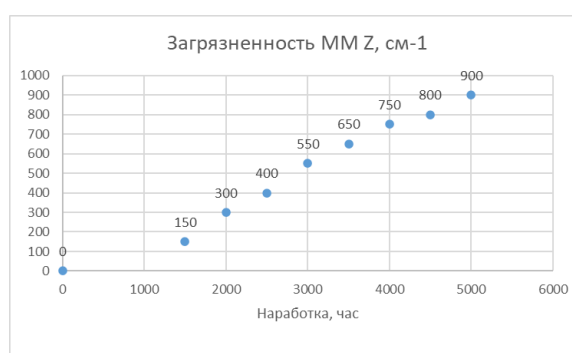


Рисунок 7– Загрязненность веществами
Figure 7 – Contamination by substances

При анализе значений, полученных в лабораторных условиях и по предложенной нами методики, видна зависимость изменения состояния гидравлического с учетом наработки.

Загрязнение гидравлического масла вследствие недостаточной фильтрации ускоряет процессы окисления и деградации масла. Это вызывает формирование коррозионных агентов и шлама, наносящих ущерб металлическим элементам, уменьшая производительность системы и увеличивая риск ее поломки [5].

Сопротивление процессам окисления масла в гидросистемах, стимулированное загрязнителями, осуществляется несколькими способами. Основное значение имеет регулярная замена масла, которая эффективно очищает систему от окисляющихся веществ и продуктов распада, способствующих окислению. Также критически важной является качественная фильтрация, задача которой — постоянное изъятие частиц, активирующих процессы окисления.

Вывод

Метод Сато-Ридела (известный также как метод Парахора), применяя калибровочные данные, обеспечивает точное определение теплопроводности гидравлического масла, что в свою очередь дает возможность предсказывать временные интервалы для его замены в системе.

Одним из ключевых преимуществ предложенной методики является ее способность ранее обнаруживать отклонения, что способствует предотвращению серьезных повреждений оборудования и снижению затрат на ремонт. Дополнительно, метод адаптирован для непрерывного контроля качества масла на протяжении всего периода эксплуатации оборудования.

Для повышения эффективности и увеличения срока службы гидравлической системы необходим регулярный анализ качества гидравлического масла и предотвращение его контаминации в процессе работы. Выполнение регламентных работ по замене масла и его очистке способствует предупреждению минимизировать риск возникновения неисправностей в системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ASTM D445-10 Стандартный метод определения кинематической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей (и расчет динамической вязкости).
2. ASTM D6595 Стандартный метод испытаний для определения продуктов износа металлов и загрязнений в отработанных смазочных маслах или отработанных гидравлических жидкостях методом атомно-эмиссионной спектроскопии с вращающимся дисковым электродом.
3. ASTM D7896 – Стандартный метод определения теплопроводности жидкостей
4. Poling, B. E., Prausnitz, J. M., & O'Connell, J. P. (2001). *The Properties of Gases and Liquids* (5th ed.). McGraw-Hill.
5. Васильева, Л.С. Химмотология топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей для автомобильного транспорта. Показатели качества. Классификация. Ассортимент. Оценка показателей качества и результатов испытаний: учеб. пособие для студ. вузов / Л.С. Васильева, Ю.В. Панов, А.А. Хазиев, А.В. Лаушкин; под ред. Л.С. Васильевой. – М., 2020. – 164 с.
6. Вернигора, Е. Р. Технология непрерывного контроля состояния моторного масла автотракторных двигателей по параметру теплопроводности / Е. Р. Вернигора, Е. В. Снятков // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК : Материалы VII Международной студенческой научной конференции, Майский, 25–27 февраля 2025 года. – Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2025. – С. 173-174. – EDN YSMEXL
7. ГОСТ Р 57294-2016 Масла гидравлические. Руководство по контролю состояния и замене.
8. Определение качества гидравлического масла по теплофизическим характеристикам / А. Н. Швырев, А. В. Латынин, Б. Н. Чумаков [и др.] // Инновационные технологии на автомобильном транспорте : Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 16–17 мая 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, 2024. – С. 28-32. – DOI 10.58168/MOTOR2024_28-32. – EDN AJDXZY.
9. Швырев, А. Н. Определение качества гидравлических жидкостей тепловым способом / А. Н. Швырев, А. В. Латынин, А. В. Чупахин // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе : Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 23 мая 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2023. – С. 65-68. – EDN CVMBJV.

REFERENCES

1. ASTM D445-10 Standard Test Method for Determination of Kinematic Viscosity of Transparent and Translucent Fluids (and Calculation of Dynamic Viscosity).
2. ASTM D6595 Standard Test Method for Determination of Metal Wear Products and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disk Atomic Emission Spectrometry.
3. ASTM D7896 – Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Fluids
4. Poling, B. E., Prausnitz, J. M., & O'Connell, J. P. (2001). *The Properties of Gases and Liquids* (5th ed.). McGraw-Hill.
5. Vasilyeva, L.S. Chemmotology of fuels, lubricants and special liquids for motor transport. Quality indicators. Classification. Assortment. Evaluation of quality indicators and test results: textbook. student's handbook. universities / L.S. Vasilyeva, Yu.V. Panov, A.A. Khaziev, A.V. Laushkin; under the editorship of L.S. Vasilyeva. – M., 2020. – 164 p.

6. Vernigora, E. R. Technology of continuous monitoring of the condition of engine oil of auto-tractor engines by the parameter of thermal conductivity / E. R. Vernigora, E. V. Snyatkov // *Gorinskie chteniya. Innovative solutions for the agro-industrial complex : Materials of the VII International student scientific conference*, Maisky, February 25–27, 2025. – Maisky: FGBOU VO Belgorod State Agrarian University, 2025. – P. 173-174. – EDN YSMEXL
7. GOST R 57294-2016 Hydraulic oils. Guide for condition monitoring and replacement.
8. Determination of the quality of hydraulic oil based on its thermophysical characteristics / A. N. Shvyrev, A. V. Latynin, B. N. Chumakov [et al.] // *Innovative Technologies in Automotive Transport: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference*, Voronezh, May 16–17, 2024. – Voronezh: G.F. Morozov Voronezh State Forestry University, 2024. – Pp. 28-32. – DOI 10.58168/MOTOR2024_28-32. – EDN AJDXZY.
9. Shvyrev, A. N. Determination of the quality of hydraulic fluids by the thermal method / A. N. Shvyrev, A. V. Latynin, A. V. Chupakhin // *Innovative technologies in the agro-industrial complex : Materials of the international scientific and practical conference*, Voronezh, May 23, 2023. – Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2023. – P. 65-68. – EDN CVMBJV.