

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Вернигора Е.Р.¹, Иванников В.А.¹, Шабанов М.Л.¹, Новиков А.П.¹, Хрипченко М.С.¹

¹ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

Автор, ответственный за переписку: Егор Романович Вернигора, vernigora.egor@inbox.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность непрерывного мониторинга гидравлических жидкостей автотранспорта по теплофизическим параметрам. Выявлена зависимость теплофизических параметров рабочей жидкости от ее окисления, обводнения и загрязнения механическими примесями. Предлагаемое техническое решение обеспечивает прогнозирование отказов гидросистем без разбора узлов и отбора проб.

Ключевые слова: гидравлическая жидкость, автомобильный транспорт, непрерывный мониторинг, теплофизические параметры, вязкость, механические примеси, окисление, теплопроводность, диагностика гидросистем.

THERMOPHYSICAL METHODS FOR OPERATIONAL MONITORING OF THE STATE OF HYDRAULIC SYSTEMS IN MOTOR VEHICLES

Vernigora E.R.¹, Ivannikov V.A.¹, Shabanov M.L.¹, Novikov A.P.¹, Khripchenko M.S.¹

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

The author responsible for the correspondence: Egor Romanovich Vernigora,
vernigora.egor@inbox.ru

Abstract. The possibility of continuous monitoring of vehicle hydraulic fluids based on thermophysical parameters has been considered. The dependence of the thermophysical parameters of the working fluid on its oxidation, water content, and contamination with mechanical impurities has been identified. The proposed technical solution provides for the prediction of hydraulic system failures without disassembling the components or taking samples.

Keywords: hydraulic fluid, automotive transport, continuous monitoring, thermophysical parameters, viscosity, mechanical impurities, oxidation, thermal conductivity, diagnostics of hydraulic systems.

Гидравлические системы транспортно-технологических автомобилей (лесозаготовительных машин, автокранов, экскаваторов, самосвалов с гидравлической разгрузкой) функционируют в экстремальных условиях, характеризующихся высокими динамическими нагрузками, широким диапазоном температур окружающей среды и значительной запылённостью воздуха. Рабочей жидкостью таких гидроприводов часто служит минеральное гидравлическое масло МГ-15-В (класс вязкости 15 по ГОСТ 17479.3-85), которое обеспечивает передачу энергии, смазку трущихся пар и отвод тепла от нагретых узлов [1]. Надёжность и долговечность гидроагрегатов напрямую зависят от состояния масла, которое в процессе эксплуатации неизбежно подвергается окислению, накоплению механических примесей (продуктов износа, абразивных частиц) и обводнению.

Особенностью транспортно-технологических машин является интенсивное тепловыделение в гидросистеме, обусловленное частыми циклами «разгон–торможение» исполнительных механизмов и продолжительной работой под нагрузкой.

Повышенная температура ускоряет деградацию масла, снижая его смазывающие и охлаждающие свойства, что в конечном счёте приводит к преждевременным отказам гидропривода и дорогостоящим простоям техники. По статистике, до 80 % отказов гидравлических систем связаны с неудовлетворительным качеством рабочей жидкости [2].

Традиционные методы контроля состояния масла (вискозиметрия, атомно-эмиссионная спектрометрия, ИК-спектроскопия) требуют отбора проб и лабораторного анализа, что неприемлемо для оперативной диагностики в полевых условиях эксплуатации транспортно-технологических автомобилей. В последние годы активно развиваются теплофизические подходы, основанные на непрерывном измерении температуры и теплопроводности масла непосредственно в гидросистеме [3,4,5]. Эти параметры чувствительны к изменению состава и концентрации примесей в жидкости и могут быть легко зарегистрированы встроенными датчиками.

Целью настоящей работы является разработка методики оперативного контроля состояния гидравлического масла МГ-15-В в гидроприводах транспортно-технологических автомобилей по теплофизическим показателям и экспериментальная проверка её эффективности. Для достижения цели решались следующие задачи:

- анализ существующих методов диагностики гидравлических масел;
- экспериментальное исследование зависимости температуры и теплопроводности масла МГ-15-В от наработки и концентрации механических примесей на стенде КИ-4200;

- построение регрессионной модели и тарировочной характеристики для оперативной оценки состояния жидкости;

- разработка практических рекомендаций по внедрению методики в бортовые системы диагностики транспортно-технологических машин.

Анализ методов контроля гидравлических масел

Существующие методы оценки качества гидравлических масел можно разделить на лабораторные и оперативные. Лабораторные методы (ASTM D445, ASTM D6595, ИК-спектроскопия) обеспечивают высокую точность, но не позволяют отслеживать динамику деградации в реальном времени. Визуальные и органолептические способы субъективны и выявляют лишь критические изменения. Онлайн-датчики загрязнений и вязкости требуют сложной калибровки и имеют высокую стоимость.

Теплофизические методы лишены указанных недостатков. Они базируются на известном факте: накопление механических примесей, продуктов окисления и воды изменяет теплофизические свойства масла – в первую очередь теплопроводность и теплоёмкость [5]. Измерение температуры в контрольных точках гидросистемы при установившемся режиме работы даёт интегральную оценку состояния жидкости, поскольку рост внутреннего трения и ухудшение теплоотвода прямо коррелируют со степенью загрязнения [6].

Теоретические основы теплофизической диагностики

Теплопроводность λ гидравлического масла зависит от его химического состава, температуры и концентрации дисперсных включений. Для многокомпонентных жидкостей эффективная теплопроводность может быть описана обобщённым уравнением Максвелла или корреляциями типа Сато–Ридела (метод Паракхора) [7]. При появлении в масле металлических частиц износа ($\lambda \approx 45$ Вт/(м·К)) на фоне базовой теплопроводности минерального масла (0,12–0,15 Вт/(м·К)) наблюдается рост эффективной теплопроводности. Одновременно продукты окисления (смолы, асфальтены) могут снижать теплопроводность. Следовательно, мониторинг изменения λ относительно эталонного значения позволяет судить о характере деградации.

Температура масла в гидросистеме является интегральным параметром, отражающим баланс между тепловыделением в узлах трения и теплоотводом. Увеличение концентрации механических примесей приводит к росту вязкости и сил трения, что повышает температуру. Экспериментально установленная корреляция позволяет по измеренной температуре оценить степень загрязнения и остаточный ресурс жидкости.

Методика экспериментальных исследований

Эксперименты проводились на универсальном стенде КИ-4200 (Рисунок 1), предназначенном для испытания гидроприводов. В качестве рабочей жидкости использовалось гидравлическое масло МГ-15-В (класс вязкости 15 по ГОСТ 17479.3-85). Стенд был оснащён шестерённым насосом НШ-46, металлическими катализаторами и датчиками температуры, установленными в гидробаке, на линии слива и в корпусе насоса.



Рисунок 6– стенд КИ-4200

Figure 1 – stand KI-4200

Испытывались семь образцов масла с наработкой от 0 до 4500 часов. Для каждого образца имитировался типовой режим работы гидросистемы автотранспортного средства (циклические нагрузки, температура окружающей среды $+20...+25$ °С). Продолжительность испытания одного образца составляла 12 часов. В ходе опытов непрерывно регистрировалась температура масла, а также отбирались пробы для определения концентрации механических примесей весовым методом.

Результаты и их обсуждение

На рисунках 2 и 3 представлены экспериментальные зависимости температуры масла от концентрации механических примесей и наработки. Видно, что с ростом концентрации примесей от 0 до 0,15 % температура повышается на 12–15 °С. Зависимость температуры от наработки носит экспоненциальный характер: в начальный период (до 500 ч) рост незначителен (приработка), затем наступает стабилизация, а после 1500 ч наблюдается интенсивный рост, обусловленный накоплением критического количества продуктов износа.

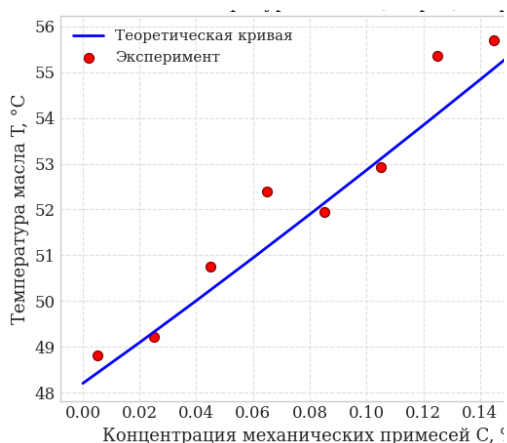


Рисунок 2 – График зависимости температуры гидравлического масла от концентрации примесей
Figure 2 – Graph of the dependence of hydraulic oil temperature on the concentration of impurities

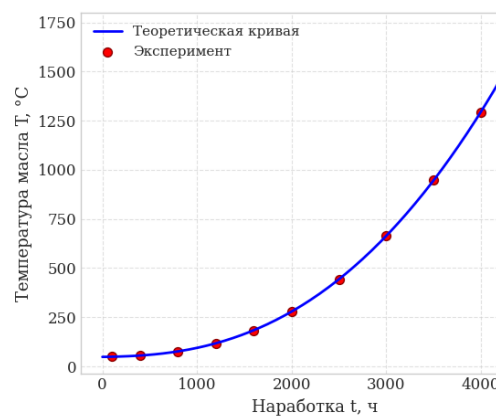


Рисунок 3 – График зависимости температуры гидравлического масла от наработки
Figure 3 – Graph of hydraulic oil temperature versus operating time

Статистическая обработка данных позволила получить регрессионную модель:
 $T = 48,2 + 43,6 \cdot C + 0,012 \cdot t$, ($R^2 = 0,92$)

где T – температура масла, °C; C – концентрация механических примесей, %; t – наработка, ч.

На основе этой модели построена тарифовочная характеристика (Рисунок 4), связывающая температуру масла в контрольной точке с концентрацией примесей. Выделены три зоны состояния жидкости:

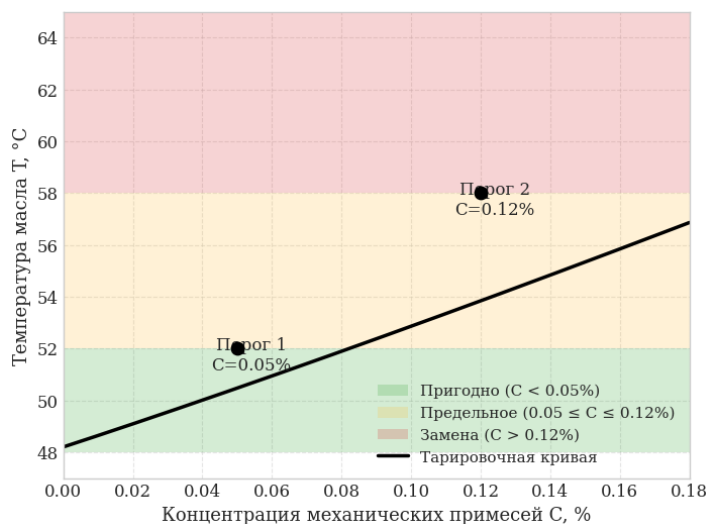


Рисунок 4 – Тарифовочная характеристика при использовании методики оперативного контроля состояния гидравлического масла

Figure 4 – Calibration characteristic using the method of operational control of the hydraulic oil condition

$C < 0,05$ % ($T < 52$ °C) – масло пригодно к эксплуатации;
 $0,05$ % $\leq C \leq 0,12$ % (52 °C $\leq T \leq 58$ °C) – предельное состояние, требуется планирование замены;
 $C > 0,12$ % ($T > 58$ °C) – масло подлежит немедленной замене.

Дополнительно на Рисунке 5 приведена зависимость теплопроводности масла МГ-15-В от наработки, рассчитанная по методу Сато–Ридела с калибровкой по экспериментальным данным [8]. Снижение теплопроводности с увеличением наработки (с $\sim 0,133$ до $0,116$ Вт/(м·К) в диапазоне 20–100 °С) подтверждает возможность использования этого параметра для диагностики.

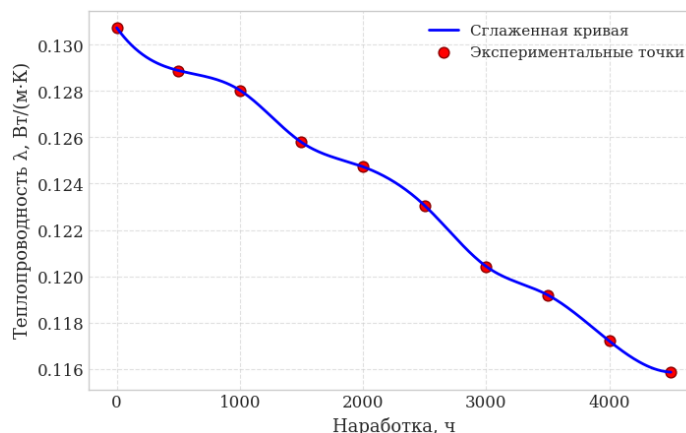


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента теплопроводности гидравлического масла от наработки (при 40°C)

Figure 5 – Dependence of the hydraulic oil thermal conductivity coefficient on the operating time (at 40°C)

Полученные результаты показывают, что простой контроль температуры в характерных точках гидросистемы (гидробак, сливная магистраль) даёт достоверную информацию о состоянии рабочей жидкости. Это открывает возможность создания недорогих бортовых систем диагностики для автотранспортных средств.

Заключение

Теплофизические методы (измерение температуры и теплопроводности) являются эффективным инструментом оперативного контроля состояния гидравлических масел в системах автомобильного транспорта.

Экспериментально подтверждена сильная корреляция между температурой масла, концентрацией механических примесей и наработкой. Разработана регрессионная модель и тарифовочная характеристика, позволяющие по измеренной температуре оценивать степень загрязнения жидкости.

Предложенная методика может быть реализована в виде встроенного диагностического модуля, что обеспечит своевременное предупреждение об ухудшении свойств масла, сократит количество внезапных отказов гидросистем и снизит эксплуатационные затраты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильева Л.С., Панов Ю.В., Хазиев А.А., Лаушкин А.В. Химмотология топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей для автомобильного транспорта. – М., 2020. – 164 с.
2. Вернигора Е.Р., Иванников В.А., Крухмалев С.Н. и др. Разработка методики оценки состояния гидравлического масла на основе его теплофизических показателей // Перспективы развития, инновации и информационные технологии на транспорте – 2025: матер. междунар. молодеж. науч.-практ. конф. – Воронеж: ВГЛУ, 2025. – С. 260–267.
3. Швырев А.Н., Латынин А.В., Чумаков Б.Н. и др. Определение качества гидравлического масла по теплофизическим характеристикам // Инновационные технологии на

автомобильном транспорте: матер. всерос. науч.-техн. конф. – Воронеж: ВГЛТУ, 2024. – С. 28–32.

4. Швырев А.Н., Латынин А.В., Чупахин А.В. Определение качества гидравлических жидкостей тепловым способом // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж: ВГАУ, 2023. – С. 65–68.

5. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 349 с.

6. ASTM D7896 Standard Test Method for Thermal Conductivity of Liquids. – ASTM International, 2010.

7. Вернигора Е.Р., Снятков Е.В. Технология непрерывного контроля состояния моторного масла автотракторных двигателей по параметру теплопроводности // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК: матер. VII междунар. студ. науч. конф. – Майский, 2025. – С. 173–174.

8. ASTM D2070-91(2010) Standard Test Method for Thermal Stability of Hydraulic Oils. – ASTM International, 2010.

REFERENCES

1. Vasilyeva L.S., Panov Yu.V., Khaziev A.A., Laushkin A.V. Khimmotologiya of Fuels, Lubricants and Special Fluids for Motor Transport. – M., 2020. – 164 p.

2. Vernigora E.R., Ivannikov V.A., Krukhmalyov S.N. et al. Development of a Method for Assessing the Condition of Hydraulic Oil Based on Its Thermophysical Properties // Development prospects, innovations and information technologies in transport – 2025: матер. international Thank you. Scientific and Practical Conference – Voronezh: VGLTU, 2025. – pp. 260-267.

3. Shvyrev A.N., Latynin A.V., Chumakov B.N. et al. Determination of the quality of hydraulic oil by thermophysical characteristics // Innovative technologies in road transport: матер. All-Russian Scientific and Technical Conference. Voronezh: VGLTU, 2024, pp. 28–32.

4. Shvyrev A.N., Latynin A.V., and Chupakhin A.V. Determining the Quality of Hydraulic Fluids by the Thermal Method // Innovative Technologies in the Agro-Industrial Complex: Materials of the Conference. International Scientific and Practical Conference. Voronezh: VSAU, 2023, pp. 65–68.

5. Vargaftik, N.B. Handbook on Thermal Conductivity of Liquids and Gases / N.B. Vargaftik, L.P. Filippov, A.A. Tarzimanov, and E.E. Totsky. – Moscow: Energoatomizdat, 1990. – 349 p.

6. ASTM D7896 Standard Test Method for Thermal Conductivity of Liquids. – ASTM International, 2010.

7. Vernigora E.R., Snyatkov E.V. Technology of continuous control of the state of engine oil of auto-tractor engines by the parameter of thermal conductivity // Gorinsky readings. Innovative solutions for the agro-industrial complex: матер. VII International Student Scientific Conference. May, 2025. Pp. 173–174.

8. ASTM D2070-91(2010) Standard Test Method for Thermal Stability of Hydraulic Oils. ASTM International, 2010