

Перспективы мониторинга работоспособности моторного масла карьерного автотранспорта

М.С. Никитенко ✉, Д.Ю. Худоногов, М.В. Ефременкова*Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук,**г. Кемерово, Российская Федерация***✉ ltd.mseng@gmail.com**

Резюме: Объектом исследования является способ оценки текущего состояния двигателя карьерного автотранспорта на основе анализа степени деградации моторного масла. Предмет исследования – функциональные возможности разработанных аппаратно-программных средств мониторинга работоспособности моторного масла на основе количественного анализа эксплуатационных данных. Проблема заключается в низкой оперативности лабораторных методов анализа характеристик работавшего моторного масла в период эксплуатации, требующей развития технологий непрерывного контроля параметров его работоспособности, обеспечивающих снижение внеплановых простоев техники за счет оперативного предупреждения аварийных режимов работы двигателей карьерного автотранспорта. Основной целью исследования являлась разработка аппаратно-программных средств мониторинга работоспособности масла и оценка соответствия получаемых количественных данных результатам лабораторных исследований и реальным режимам работы агрегата в условиях эксплуатации. В работе применены диэлектрический и спектральный методы анализа проб моторных масел. По результатам анализа комплекта эксплуатационных проб моторного масла различными методами сделан вывод о соответствии получаемых количественных данных содержанию элементов-маркеров деградации масла, в качестве которых выбраны алюминий, медь, железо, натрий, свинец и кремний. Сделан вывод о неравномерности деградации масла и её зависимости от технического состояния конкретного двигателя. Показаны результаты анализа эксплуатационных данных при агрегатной установке системы мониторинга, в частности, возможность регистрации резких изменений состояния моторного масла в режиме реального времени. Сформулированы преимущества развития и внедрения аппаратно-программных средств мониторинга работоспособности масла и анализа получаемых данных для предотвращения внеплановых простоев за счет своевременного проведения сервисных и ремонтных работ.

Ключевые слова: горные машины, карьерный самосвал, двигатель, моторное масло, износ, экспресс-анализ, система мониторинга, автоматизированный контроль, агрегатная диагностика, снижение внеплановых простоев

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0025 «Разработка научных основ создания автономных и автоматизированных горных машин, оборудования, технических и управляющих систем на базе перспективных цифровых и роботизированных технологий (продление)» (рег. №125013101207-7).

Для цитирования: Никитенко М.С., Худоногов Д.Ю., Ефременкова М.В. Перспективы мониторинга работоспособности моторного масла карьерного автотранспорта. *Горная промышленность*. 2025;(5):160–166. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-160-166>

Prospects for monitoring engine oil performance in mining dump trucks

M.S. Nikitenko ✉, D.Yu. Khudonogov, M.V. Efremenкова*Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation***✉ ltd.mseng@gmail.com**

Abstract: The object of the study is the method for assessing the current condition of mining dump truck engines based on analyzing the degree of engine oil degradation. The subject of the study is the functionality of the developed hardware and software to monitor the performance of engine oil based on the quantitative analysis of the operational data. The problem lies in the low efficiency of the laboratory methods for analyzing the characteristics of used engine oil during operation. It requires the development of technologies for continuous monitoring of the engine oil performance parameters and ensuring the reduction of unscheduled downtime of the equipment due to timely prevention of emergency operation of the mining vehicle engines. The main objective of the study was to develop a hardware and software suite for monitoring the performance of oil and assess

the compliance of the obtained quantitative data with the results of laboratory studies and real operating modes of the unit under operating conditions. The work uses dielectric and spectral methods to analyze engine oil samples. Based on the results of analyzing a set of operational samples of engine oil using various methods, a conclusion was made about the compliance of the obtained quantitative data with the content of the oil degradation marker elements, which are Al, Cu, Fe, Na, Pb and Si. A conclusion is made about the unevenness of oil degradation and its dependence on the technical condition of a specific engine. The results of analyzing the operational data are shown for the monitoring system installation on the unit, in particular the possibility of recording abrupt changes in the condition of the engine oil in real time. The advantages are formulated of the development and implementation of the hardware and software suite for monitoring the oil performance and analyzing the data obtained to prevent unscheduled downtime through the timely performance of the service and repair work.

Keywords: mining machines, mining dump truck, engine, engine oil, motor oil, express analysis, monitoring system, automated control system, technical diagnostics, downtime reduction

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project FWEZ-2024-0025 "Development of scientific foundations for the creation of autonomous and military mining machines, equipment, technical and control systems based on promising digital and robotic technologies (prolongation)". (reg. No.125013101207-7).

For citation: Nikitenko M.S., Khudonogov D.Yu., Efremenkova M.V. Prospects for monitoring engine oil performance in mining dump trucks. *Russian Mining Industry*. 2025;(5):160–166. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-160-166>

Введение

В соответствии с Программой развития угольной промышленности России на период до 2035 года применение единых информационно-управляющих инфраструктур, предназначенных для мониторинга и управления любым технологическим оборудованием на разрезе при вскрышных и добывающих работах, является одним из приоритетных направлений в части технологии открытых горных работ¹. Внедрение информационных технологий, в частности, использование систем мониторинга и управления оборудованием, позволяющих оперативно выявлять неисправности и предотвращать простой, является одним из основных направлений стратегии развития угольной промышленности Российской Федерации. Стратегия направлена на повышение эффективности отрасли и снижение негативного воздействия на окружающую среду. Одним из ключевых аспектов является оптимизация использования оборудования и технологий, что включает меры по снижению уровня простое техники.

При этом согласно результатам анализа отказов узлов карьерных самосвалов в условиях эксплуатации простой по причине неисправности двигателя внутреннего сгорания могут составлять до 25 % случаев в год [1]. Причин возникновения неисправности двигателя множество, в частности, при масляном голодании в процессе работы возникает выплавление подшипников скольжения коленчатых валов, выплавление втулок распределительных валов, разрушение приводных и промежуточных шестерен, клапанов, поршней, поршневых колец, крейцкопфов и других деталей механизма. На практике контроль за работой двигателей осуществляется, как правило, приборами контроля – датчиком давления и датчиком температуры масла с выводом данных, либо на указатели водительского щитка, либо на экран-дисплей в современных автомобилях. Эти устройства в какой-то мере предупреждают водителя о состоянии масла в системе смазки двигателя – в случае перегрева масла и падения давления в системе. Однако не всегда водитель успевает своевременно заметить и, тем более, мгновенно отреагировать на изменения состояния смазывающего масла в двигателе. Как правило, времени реакции водителя недостаточно для останов-

ки работы двигателя, за это время происходят необратимые процессы с комплектующими деталями двигателя – выплавление подшипников скольжения коленвала и втулок распределала, поломка приводных шестерен, клапанов и т.д. В результате двигатель выходит из строя с серьезными последующими поломками комплектующих деталей, как правило, подводящими техническое состояние двигателя к капитальному ремонту.

Несвоевременная остановка работы двигателей нежелательна, поскольку она приводит к остановке самосвалов и несет за собой значительные затраты на капитальный ремонт, но, к сожалению, имеет повсеместную распространенность при эксплуатации дизельных двигателей, устанавливаемых на шасси большегрузных карьерных самосвалов БелАЗ, Komatsu, Volvo и др. В этой связи можно заключить, что двигатель является наиболее ответственным агрегатом, отказ которого приводит к простоям техники и отрицательно влияет на коэффициент технической готовности автопарка.

Материалы и методы

Для контроля качества как новых, так работавших в период эксплуатации моторных масел, наиболее широко применяется комплекс мероприятий, основанный на методах лабораторных исследований [2]. С учетом анализа полученных результатов принимаются решения по дальнейшей эксплуатации. Такой подход предполагает соблюдение временных регламентов забора проб и технических предписаний сервисных компаний, осуществляющих ремонт и обслуживание автотранспортных средств. Периодичность отбора проб определяется количеством наработанных моточасов или графиком отбора проб через равные временные интервалы.

К наиболее известным методам такого контроля относятся спектральные методы исследования, атомно-эмиссионные, атомно-абсорбционные, рентгено-флуоресцентные и феррографические [3; 4]. Кроме того, применяются измерения кислотного и щелочного числа моторного масла и вязкости масла [5–7]. Дальнейшая интерпретация результатов позволяет определить уровень загрязнения масла частицами износа. Известны также методы трибодиагностики [8], определяющие механизм образования частиц износа, которые образуются в результате трения или усталости механизмов двигателей.

¹ Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 13.06.2020 г. №1582-р.

Таким образом, оценка технического состояния двигателей сводится к анализу результатов проб моторного масла [9]. Несмотря на высокую информативность результатов лабораторных исследований, возможность установить причину появления соответствующих частиц износа, такой подход не является оперативным, не позволяет проводить текущий мониторинг состояния масла и двигателя. На практике время с момента отбора пробы до заключения о безопасности последующей эксплуатации может составлять десятки моточасов. При этом возникающие и имеющиеся проблемы за это время могут иметь губительные последствия для агрегата и приводить к аварийным ситуациям, простойм техники и, как следствие, значительным финансовым затратам и снижению эффективности добычи полезных ископаемых. Кроме того, регулярное выполнение спектрального анализа всегда связано с регулярными финансовыми затратами на их проведение, поскольку не в каждом автопарке имеются лаборатории, оборудованные программно-аппаратными комплексами спектрального анализа.

Достижение эффективности работы агрегатов, обеспечение безаварийной работы дизельных и бензиновых двигателей, предотвращение неконтролируемых аварийных остановок и предупреждение долгостоящих ремонтов, по мнению авторов, возможно путем развития технологий непрерывного контроля параметров работоспособности моторного масла с выводом данных на контрольный пост оператора.

Современное состояние исследований в области непрерывного контроля работоспособности моторного масла имеет три основных направления. Первое – это применение методов экспресс-контроля, по результатам которого производится долив нового моторного масла в определенном анализом объеме. Второе – оценка температурного режима работы масла и оценка его влияния на рабочие показатели масла [10]. Третье – применение датчиков непрерывного контроля.

К наиболее распространенному методу непрерывного контроля относится диэлектрический метод [11], основанный на диэлектрической проницаемости органических сред [12; 13]. Однако практика промышленного применения технологии на отечественных добывающих предприятиях в настоящее время еще достаточно низкая. Причины этого могут заключаться в недостаточной информированности технических специалистов о преимуществах и перспективах внедрения технологии, отсутствии комплексного подхода в вопросах интеграции подобных систем, нежелании внесения организационных изменений в устоявшуюся структуру управления на предприятии. Кроме того, возникает закономерный вопрос о соответствии результатов экспресс-анализа результатам лабораторных исследований эксплуатационных проб моторных масел.

Результаты и обсуждение

Авторами проведены работы по сопоставлению результатов лабораторных исследований и данных экспресс-анализа. Экспресс-анализ основан на оценке диэлектрических свойств моторного масла, при его выполнении производится измерение электропроводности и емкости при прохождении высокочастотного сигнала между двумя электродами, погруженными в образец. Технология имеет законченное решение в форме конструктивного элемента – сенсора, который был использован для экспресс-анализа проб [14; 15].

Наглядное сопоставление результатов лабораторного анализа спектральным методом и экспресс-анализа количественного показателя работоспособности моторного масла в единицах шкалы работоспособности масла (ШРМ) диэлектрическим методом на примере отраслевых данных представлено на рис. 1.

Входные данные – девять самосвалов (с условными номерами от №1 до №9) с одинаковыми двигателями в разном техническом состоянии. Три комплекта проб моторного масла G-Profi MSI Plus 15W-40 с наработкой 250, 350 и 500 моточасов после его плановой замены. В качестве основных маркеров состояния масла выбраны следующие химические элементы – Al, Cu, Fe, Na, Pb и Si. Левая шкала на диаграмме отображает содержание элементов в пробах моторного масла, правая – значение показателя работоспособности масла в единицах ШРМ. Допустимый уровень содержания элементов в пробах принят следующий: Al – 8 г/т; Cu – 15 г/т; Fe – 30 г/т; Na – 10 г/т; Pb – 10 г/т; Si – 10 г/т. Значения содержания элементов, превышающие указанный уровень, обозначены красным цветом, некоторые из которых значительно выходят за пределы шкалы, им присвоены соответствующие числовые значения.

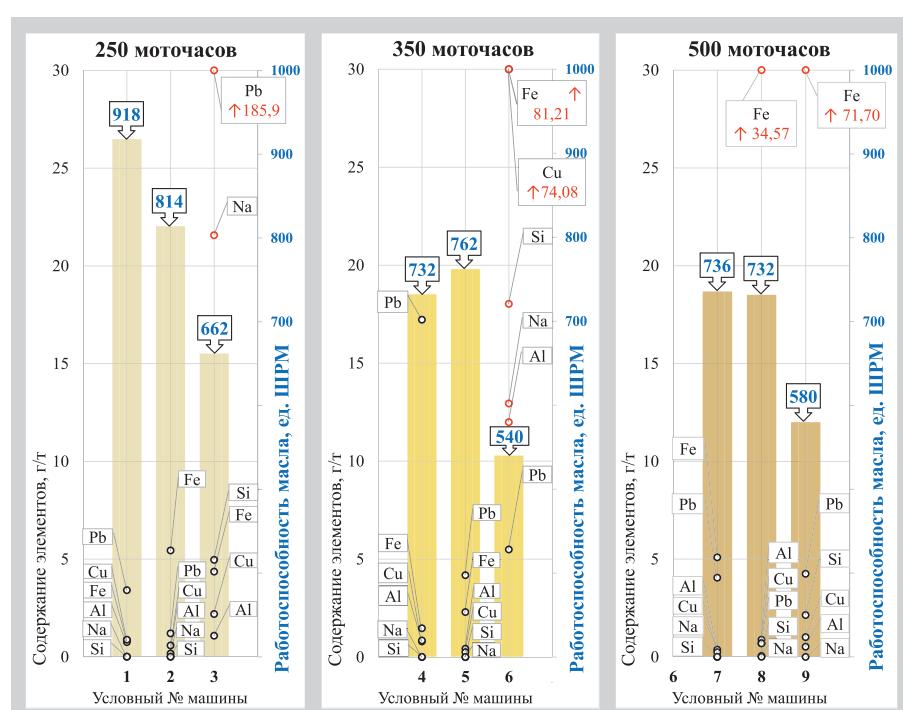


Рис. 1
Диаграммы сопоставления результатов спектрального анализа и экспресс-анализа количественного показателя работоспособности проб моторного масла с различной наработкой

Fig. 1
Diagrams comparing the results of the spectral and express analyses of the quantitative performance indicator of motor oil samples with different operating time

Для шкалы ШРМ значения свыше 740 единиц – все показатели в пределах нормы. Ниже 740 единиц до 600 единиц – существенная деградация, моторное масло ещё сохраняет рабочие характеристики, но требует постоянного контроля (последующее сопоставление с данными спектрального анализа с большой вероятностью покажет, что содержание одного или более элементов превышает предельно допустимые значения). Данные менее 600 единиц – масло деградировано, дальнейшая эксплуатация может привести к повышенному износу или повреждению деталей двигателя.

В результате анализа полученных диаграмм сделаны следующие выводы:

1. Повышенное содержание одного либо нескольких химических элементов-маркеров влияет на работоспособность масла и снижает значения количественного показателя состояния масла. Повышенное содержание свинца и натрия в одной из проб с малой наработкой в 250 моточасов может быть причиной износа подшипников и вкладышей коленчатого вала [16]. Такие существенные изменения отражаются и в количественных единицах оценки работоспособности масла, сразу попадая в зону существенной деградации [14; 15].

2. Пробы масел с разных автомобилей имеют неравномерный уровень деградации масла, который зависит от технического состояния двигателя. В пробе №4 наблюдается повышенное содержание свинца, что может свидетельствовать об износе подшипников коленчатого вала. В пробе №5 содержание всех элементов повышенено, но значения находятся в допустимых пределах, что объясняется нормальной работой двигателя, соответствующей своей наработке [17]. Проба №6 показывает сильный износ двигателя, повышение содержания большинства элементов-маркеров, работоспособность масла крайне низкая. На такую машину следует обратить внимание в первую очередь при составлении графика сервисных работ. Для борта №9 увеличение концентрации веществ может указывать на множество причин: износ колец, гильз цилиндров, коленчатого вала, поршневых колец, коленчатого и распределительного вала, штанг [16] шестерен распределения и масляного насоса [17]. В пробе №8 содержание железа также повышенено, но, сопоставив данные с пробегом, можно предположить, что это результат взаимного трения деталей двигателя, а также выделения оксида железа под воздействием кислот [18]. В пробе №7 содержание элементов в пределах нормы, но показатель работоспособности снижен, это говорит о том, что другие свойства масла, такие как вязкость, общее щелочное число, общее кислотное число и диэлектрическая проницаемость, снижены.

3. Не для всех двигателей показатель наработки в моточасах (регламент) следует считать обоснованным и рекомендованным в равной степени. Масло в двигателе борта №6 при меньшей наработке имеет значительно более низкие показатели работоспособности масла, чем в двигателе борта №7. Подтверждение этому можно увидеть по результатам спектрального анализа – значения содержания масле практических всех элементов-маркеров значительно повышены. Таким образом, текущее техническое состояние каждого двигателя может быть косвенно оценено в количественных единицах. А при агрегатном оснащении двигателей системой мониторинга состояния масла данные могут быть получены оператором в режиме реального времени.

Такое сопоставление результатов лабораторных исследований с показаниями на основе диэлектрического

сенсора позволяет выполнять количественную оценку работоспособности масла во время эксплуатации, а также проводить калибровку сенсора для каждого конкретного используемого моторного масла и формировать индивидуальную шкалу оценки его работоспособности.

Безусловно, следует отметить, что на количественный анализ работоспособности моторного масла оказывает влияние не только содержание частиц износа и химических элементов, но и другие его физико-технические, реологические и трибологические свойства, характеризующие деградацию (загрязнение, окисление, износ) в процессе эксплуатации. Поэтому исследования, направленные на установление зависимостей влияния конкретных свойств смазочных материалов на степень их деградации в эксплуатационном периоде, являются весьма актуальными, но требуют накопления достаточного объема статистических данных, полученных в реальных условиях и на конкретных моделях двигателей.

Техническое решение

Ранее проведенные исследования с применением диэлектрического сенсора [14; 15; 19] позволили разработать и запустить в тестовую эксплуатацию систему оперативного контроля работоспособности моторного масла на одном из разрезов Кузбасса, которая включает: диэлектрический сенсор; блок обработки показаний датчика; модуль беспроводной передачи информации GSM. Пример монтажа системы контроля работоспособности масла на двигатель Cummins QSK-78 (БелАЗ 7560) приведен на рис. 2.

Предлагаемая система позволяет оперативно, а значит своевременно, предупреждать об изменениях эксплуатационных показателей масла в процессе работы самосвалов как на основе отобранных по регламенту проб, так и в период между ними. Сенсор устанавливается в контур масляной системы двигателя транспортного средства и позволяет вести автоматизированный непрерывный мониторинг за состоянием масла, регистрировать изменения и своевременно реагировать на них.

Комплекс таких решений становится конструктивным элементом двигателя для своевременного сигнала на пост оператора непредвиденного выброса в состав масла продуктов износа, загрязнений, воды, антифриза или иных веществ и частиц.

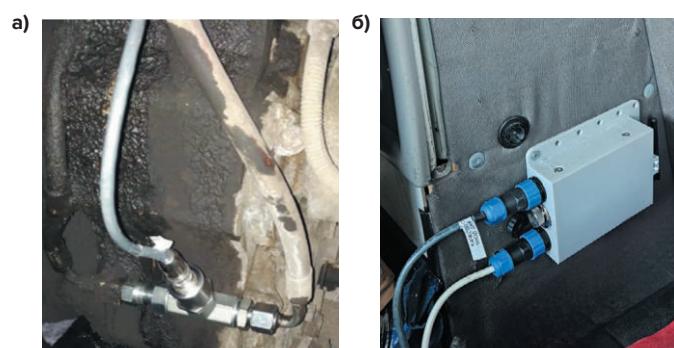


Рис. 2
Комплекс аппаратно-программных средств мониторинга работоспособности моторного масла: а – монтаж сенсора в масляный контур двигателя; б – модуль сбора и передачи данных на пульт оператора

Fig. 2
The hardware and software suite for monitoring the performance of engine oil:
a – a sensor installed in the engine oil circuit; b – a module for collecting and transmitting data to the operator's control panel

Таблица 1
Данные показателей масла

Table 1
Oil performance indicators

Шкала работоспособности масла, ед.	Температура масла, °C	Состояние масла	Комментарий
650–701	90–100	Норма	Наблюдались кратковременные, незначительные ухудшения показателей до 550 ед. ШРМ
–	–	–	Простой
680–720	90–100	Норма	Улучшение рабочих показателей масла
631–700	90–120	Норма с отклонением	Зафиксированы отклонения в рабочих показателях масла, отмечены на графике рисунка точками A1 (600 ед. ШРМ), A2 (989 ед.) – A3 (620 ед. ШРМ) и A4 (989 ед. ШРМ) – A5 (660 ед. ШРМ)

Примечания: Чистая точка масла Valvoline Premium Blue 15W40 в шкале работоспособности масла равна 750 ед. Интерпретация количественных показателей во время эксплуатации позволяет определить текущее состояние моторного масла в режиме реального времени:

- от 850 до 650 – все показатели в норме;
- от 650 до 550 – средний уровень показателей, необходима сервисная проверка;
- от 550 до 450 – масло в начальной стадии деградации;
- от 450 и ниже – деградация масла;
- от 950 и выше – деградация масла.

Эффективность применения системы мониторинга работоспособности моторного масла представлена ниже в виде информации, аналогичной выдержкам из технических отчётов, с анализом данных установленных комплектов оборудования на карьерном автотранспорте, работающих в режиме тестовой эксплуатации. Результаты показателей работоспособности моторного масла Valvoline Premium Blue 15W40 карьерного самосвала БелАЗ 7560 приводятся в табл. 1.

Анализ эксплуатационных данных

Количественные показатели работоспособности масла находились в норме, резких изменений в ШРМ не наблюдалось. Показатели температуры составляли от 90 до 100°C. На рис. 3 и 4 приведен пример отображения показателей в шкале ШРМ и температуры.

На рис. 4 представлен график рабочих показателей при регламентной замене масла – показатели улучшены с 790 до 870 ед.

Как видно на данных с другой машины, представленных на рис. 5, после замены масла регистрируется явное улучшение показателей, в том числе и температуры, в сравнении с показателями чистого масла – после замены его показатели близки к отметке 900 ед. До замены масла средний показатель был равен 720 ед., а после замены составил 890 ед. ШРМ.

Также при длительной эксплуатации и значительной наработке с момента замены в показателях масла могут наблюдаться резкие отклонения показателей ШРМ, аналогичные зарегистрированным на рис. 4 и 5. Динамика таких отклонений ШРМ укрупнено представлена на рис. 6.

В табл. 2 приведен анализ отклонения показателей ШРМ в соответствии с временными метками сервера сбора данных.



Рис. 3
Эксплуатационные показатели моторного масла в режиме реального времени

Fig. 3
Real-time engine oil performance and temperature



Рис. 4
Показатели работоспособности моторного масла при регламентной замене:
а – показатели до замены;
б – показатели после замены

Fig. 4
Performance indicators of the engine oil at a scheduled oil change:
a – indicators before the oil change; б – indicators after the oil change

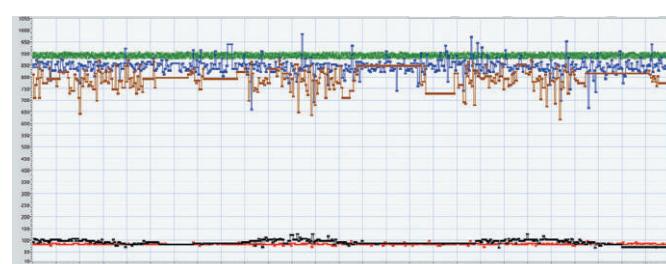


Рис. 5
Показатели работоспособности и температуры моторного масла:
зеленый – до эксплуатации;
коричневый – во время эксплуатации до замены масла;
синий – во время эксплуатации после замены масла;
черный – температура до замены масла;
красный – температура после замены масла

Fig. 5
Performance indicators and temperature values of the engine oil:
green – before operation;
brown – during operation, but before oil change;
blue – during operation after oil change;
black – the temp. before oil change;
red – the temp. after oil change

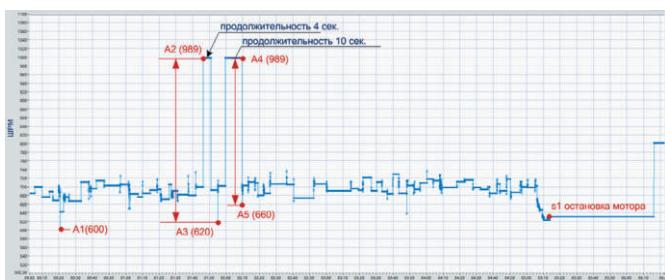


Рис. 6
Динамика резких отклонений эксплуатационного показателя работоспособности

Fig. 6
Dynamics of sharp deviations in the operational indicator

Зафиксированные резкие отклонения в рабочих показателях масла на коротких интервалах времени отмечены на графике отклонения показателей ШРМ. Они могут появляться по причине появления в моторном масле взвешенных частиц металла в результате повышенной вибрации. Рекомендовано провести диагностический осмотр двигателя и взять пробу для проведения спектрального анализа в лабораторных условиях.

Таким образом, на основе технических отчетов в процессе эксплуатации появляется возможность:

- в режиме реального времени отслеживать состояние масла и с заданным временным интервалом, отправлять технологические данные на пульт оператора и проводить анализ;
- оперативно выявлять факты резкого ухудшения качества масла в период между регламентным забором проб;
- выдавать своевременную рекомендацию для внепланового (вне регламентного) забора пробы масла на лабораторный анализ спектральным и иными методами;
- снизить вероятность внезапного выхода из строя двигателей карьерного автотранспорта;
- повысить качество планирования капитальных ремонтов двигателей;

Таблица 2
Анализ отклонений рабочих показателей масла

Table 2
Analysis of variations in the oil performance indicators

Метка времени	Шкала работоспособности масла, ед.	Температура масла, °C	Состояние масла
08:46:17	700	100	Норма
08:46:18	998	120	Отклонение
08:51:00			
-	692	100	Норма
08:55:06			
08:59:35	998	120	Отклонение
09:09:31			
-	698	100	Норма
12:06:21			
12:07:32	672	105	Норма

– повысить коэффициент технической готовности автопарка.

Заключение

Развитие и внедрение агрегатных систем мониторинга, сбор, накопление и анализ статистических данных, их сопоставление с результатами лабораторных исследований позволяют одновременно достичь двух целей – решить отраслевую задачу контроля за состоянием автопарка и повышения коэффициента технической готовности, а также сформировать базу для научного обоснования снижения трибологических свойств масел в условиях эксплуатации, изучения эксплуатационных процессов деградации моторных масел, развития методов анализа эксплуатационных изменений масел экскаваторно-автомобильного комплекса.

Список литературы / References

1. Кузин Е.Г., Пудов Е.Ю., Дубинкин Д.М. Анализ отказов узлов карьерных самосвалов в условиях эксплуатации. *Горное оборудование и электромеханика*. 2021;(2):55–61. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2021-2-55-61>
Kuzin E.G., Pudov E.Yu., Dubinkin D.M. Analysis of failures of mining dump truck components under operating conditions. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2021;(2):55–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2021-2-55-61>
2. Новиков Е.А., Кирюхин М.В. Анализ масел в процессе их эксплуатации. Неизведанная территория. *Аналитика*. 2015;(3):36–47. Режим доступа: <https://www.j-analytics.ru/journal/article/4684> (дата обращения: 27.05.2025).
Novikov E., Kiryukhin M. Used oil analysis. An uncharted territory. *Analytics*. 2015;(3):36–47. (In Russ.) Available at: <https://www.j-analytics.ru/journal/article/en/4684> (accessed: 27.05.2025).
3. Хайдарьянов Р.Р. Методы контроля качества работавшего моторного масла. *Вестник науки*. 2021;3(5-1):167–172. Режим доступа: <https://www.vestnik-nauki.ru/article/4458> (дата обращения: 27.05.2025).
Khaidaryanov R.R. Quality control methods of used engine oil. *Science Bulletin*. 2021;3(5-1):167–172. (In Russ.) Available at: <https://www.vestnik-nauki.ru/article/4458> (accessed: 27.05.2025).
4. Korneva I., Sinyavsky N., Kostrikova N. Marine motor oils refractometry. *AIP Conference Proceedings*. 2024;3243(1):020106. <https://doi.org/10.1063/5.0247383>
5. Myalo O.V., Myalo V.V., Demchuk E.V. Experimental study of highly alkaline motor oils in express diagnostics by drop test method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;954:012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/954/1/012050>
6. Suhanto, Faizah F., Kustori, Setiyo, Suwito. Implementing fuzzy logic as a control and monitor of oil quality using android. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1845:012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1845/1/012056>
7. Sejkorová M., Kučera M., Hurtová I., Voltr O. Application of FTIR-ATR Spectrometry in conjunction with multivariate regression methods for viscosity prediction of worn-out motor oils. *Applied Sciences*. 2021;11(9):3842. <https://doi.org/10.3390/app11093842>

8. Цзян Ч., Лю Т., Чжан Б., Лю С., Ву М., Лу Л. и др. Повышение триботехнических свойств минерального масла модифицированными наночастицами ZnO. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2025;(3):172–179.
Zhengquan J., Tianwang L., Bo Zh., Xiao L., Mianmeng Wu., Lianqiao Lu. et al. Improved tribotechnical properties of mineral oil by modified ZnO nanoparticles. *Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki.* 2025;(3):172–179. (In Russ.)
9. Myalo O.V., Myalo V.V., Demchuk E.V. How the key indicators of motor oil quality affect the reliability of engine assemblies in tractors. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021;666:032053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/3/032053>
10. Ковальский Б.И., Безбородов Ю.Н., Селиванов Н.И., Петров О.Н., Шрам В.Г., Сокольников А.Н. Метод контроля температурной деструкции на вязкостно-температурные свойства моторных масел. *Вестник Омского государственного аграрного университета.* 2016;(1):210–215.
Kovalskiy B.I., Bezborodov Yu.N., Selivanov N.I., Petrov O.N., Shram V.G., Sokolnikov A.N. Control of the influence of temperature on degradation processes viscosity-temperature properties of engine oils. *Vestnik Omskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta.* 2016;(1):210–215. (In Russ.)
11. Долгова Л.А. Реализация системы контроля эксплуатационных свойств моторного масла. *Международный технический журнал.* 2024;(5):25–35.
Dolgova L.A. Implementation of the engine oil performance control system. *International Technical Journal.* 2024;(5):25–35. (In Russ.)
12. Измествьев И.В., Коняев С.А. Изменение диэлектрических свойств некоторых моторных масел при их деструкции. *Вестник Пермского университета. Серия: Физика.* 2012;(1):85–90.
Izmestiev I.V., Konyaev S.A. Change of dielectric properties some engine oils at their destruction. *Bulletin of Perm University. Physics.* 2012;(1):85–90. (In Russ.)
13. Ковалишин Ф.П. Диэлектрическая спектроскопия судовых смазочных материалов. *Вестник молодежной науки.* 2022;(2):1–5. [https://doi.org/10.46845/2541-8254-2022-2\(34\)-19-19](https://doi.org/10.46845/2541-8254-2022-2(34)-19-19)
Kovalishin F.P. Dielectric spectroscopy of marine lubricants. *Vestnik Molodezhnoy Nauki.* 2022;(2):1–5. (In Russ.) [https://doi.org/10.46845/2541-8254-2022-2\(34\)-19-19](https://doi.org/10.46845/2541-8254-2022-2(34)-19-19)
14. Худоногов Д.Ю., Ефременкова М.В., Никитенко М.С., Кизилов С.А. Контроль качества моторного масла карьерных самосвалов на основе высокочастотной обработки проб. *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов.* 2023;(9):145–149.
Khudonogov D.Yu., Efremenkova M.V., Nikitenko M.S., Kizilov S.A. Quality control of engine oil of quarry dump trucks based on high-frequency sample processing. *Naukoemkie Tekhnologii Razrabotki i Ispolzovaniya Mineralnykh Resursov.* 2023;(9):145–149. (In Russ.)
15. Ефременкова М.В., Вдовенко А.Д. Контроль качества моторного масла на основе диэлектрической проницаемости проб. В кн.: Спиридонова Т.А. (ред.) Кузбасс: образование, наука, инновации: материалы 12-й Инновационного конвента, г. Кемерово, 8 февраля 2024 г. Кемерово: КемГУ; 2024. С. 19–22.
16. Федин Н.А., Рябов С.С. Показатели оценки качества отремонтированных двигателей и источники поступления продуктов износа в моторное масло. *Мир транспорта и технологических машин.* 2015;(3):54–61.
Fedin N.A., Ryabov S.S. The indicators of an assessment of quality of the repaired engines and sources of deterioration products in engine oil. *Mir Transporta i Tekhnologicheskikh Mashin.* 2015;(3):54–61. (In Russ.)
17. Королев А.Е. Взаимосвязь индикаторов износа двигателей. Успехи современной науки. 2017;6(3):28–30.
Korolev A.E. The relationship of indicators of engine wear. *Uspekhi Sovremennoy Nauki.* 2017;6(3):28–30. (In Russ.)
18. Smiggins R., Amatnieks K., Birkavs A., Górska K., Kryshtopa S. Studies on engine oil degradation characteristics in a field test with passenger cars. *Energies.* 2023;16(24):7955. <https://doi.org/10.3390/en16247955>
19. Худоногов Д.Ю., Ефременкова М.В., Никитенко М.С., Кизилов С.А. Система контроля качества масла в режиме реального времени эксплуатации агрегатов в полевых и лабораторных условиях. В кн.: Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022: тр. Всерос. науч.-практ. конф. (с международ. участием), г. Новокузнецк, 15–16 декабря 2022 г. Новокузнецк: СибГИУ; 2022. С. 90–95.

Информация об авторах

Никитенко Михаил Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8752-1332>; e-mail: ltd.mseng@gmail.com

Худоногов Данила Юрьевич – научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: admolv@gmail.com

Ефременкова Маргарита Витальевна – инженер, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: margaritasistuk@mail.ru

Information about the authors

Mikhail S. Nikitenko – Cand. Sci. (Eng.), Head of laboratory, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8752-1332>; e-mail: ltd.mseng@gmail.com

Danila Yu. Khudonogov – Scientific Researcher, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: admolv@gmail.com

Margarita V. Efremenkova – Engineer, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: margaritasistuk@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.06.2025
Поступила после рецензирования: 03.08.2025
Принята к публикации: 04.08.2025

Article info

Received: 25.06.2025
Revised: 03.08.2025
Accepted: 04.08.2025