

Задорожная Е.А., Оводов П.В.
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет), г. Челябинск
E-mail: elena-nea@rambler.ru

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

В данной статье рассматривается проблема диагностирования состояния теплового двигателя и выявления неисправностей его узлов на ранней стадии, без выведения из эксплуатации узлов трения. Одним из условий надежной и безопасной эксплуатации двигателей является их контроль и диагностика, так как при эксплуатации автомобиля под воздействием различных факторов смазочный материал теряет свои первоначальные свойства. Особое внимание уделено возможным методам диагностирования. Авторами предложены концепции, что преимущества диагностики по анализу состояния смазочного материала заключаются в экономии материальных и трудовых ресурсов, уменьшении простоев двигателя из-за неисправностей, увеличении ресурса двигателя, снижении затрат на текущий ремонт, сокращении расхода запасных частей, а также уменьшения расхода топлива и масла. Авторами предложена методика проведения исследования с использованием современного диагностического оборудования. В статье описана технология отбора и подготовки проб. Авторы предлагают использовать три основных метода: гранулометрический метод, метод инфракрасной спектроскопии, метод феррографии.

На основании исследования динамики изменения содержания частиц изнашивания в моторном масле, ИК-спектров и феррограмм моторного масла Castrol EDGE Professional 0W-30 в процессе его эксплуатации в двигателях B5254T и B6324S, применяемых на автомобилях Volvo, выполнено диагностирование узлов трения тепловых двигателей. Результаты исследований показали, что использование методики позволит корректировать сроки замены масла, предупреждать выход из строя жизненно важных частей двигателя, производить мониторинг изнашивания двигателя и проводить техническое обслуживание для обеспечения безотказной работы двигателя на протяжении всего срока службы.

Ключевые слова: феррография, инфракрасная спектроскопия, моторное масло, гранулометрический метод

Введение. Как известно, двигатель имеет три временных интервала, которые соответствуют стадиям приработки, нормальной эксплуатации и старения. Обычно стадия приработки длится до пробега 5000 км. Длительность стадии нормальной эксплуатации зависит от конструктивных особенностей двигателя, условий эксплуатации и степени соблюдения основных требований по обслуживанию автомобиля.

Самым продолжительным и стабильным является период устойчивой работы, износ практически не наблюдается. Именно поэтому важно знать ресурс смазочного материала (СМ) и время его замены. Использование качественного СМ, правильность его подбора, наряду с правильной эксплуатацией и своевременной заменой поможет продлить ресурс автомобиля.

Одним из условий надежной и безопасной эксплуатации двигателей является их контроль и диагностика при эксплуатации. При этом контроль должен быть оперативным, своевременным и достоверным без разборки и вмешатель-

ства в конструкцию, обеспечивая эксплуатацию двигателя в течение установленного ресурса.

Результаты исследований современных авторов [1]–[8], а также опыт, накопленный в разных странах, дает основание утверждать, что диагностика двигателя по анализу работающего моторного масла является надежным способом выявления неисправностей. При разборке прогнозируемые дефекты подтверждаются в 95% случаев [1]. СМ является эффективным, гибким, изменяемым и контролируемым элементом и накопителем информационных признаков состояния двигателя. В работах [2] и [3] доказано, что преимущества диагностики по анализу СМ заключаются в экономии материальных и трудовых ресурсов, уменьшении простоев двигателя из-за неисправностей, увеличении ресурса двигателя на 40%, снижении затрат на текущий ремонт на 10%, сокращении расхода запасных частей на 11%, уменьшения расхода топлива и масла. В работе [4] успешно применена методика диагностики судовых дизельных двигателей на основе анализа работавшего моторного масла.

Авторы работ [4] и [5] экспериментально доказали, что стандартные методы анализа СМ становятся непригодными в связи с введением в масло новых присадок. Многие исследователи [6]–[8] считают, что для исследования СМ необходимо применять комплексную методику, состоящую из нескольких методов для оценки загрязненности СМ механическими частицами, химического состава, которые бы учитывали особенности исследуемых СМ (наличие большого числа присадок, многокомпонентный состав).

В феррографическом атласе [9] приводятся последовательность действий и основные аспекты, которые нужно учитывать при проведении анализа СМ.

На основании анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что существующие стандартные методики не всегда обеспечивают объективную оценку состояния СМ, являются длительными и трудоемкими. Поэтому разработка современной комплексной методики диагностирования автомобильных двигателей представляется актуальной.

Технические требования к моторным маслам. Моторное масло может длительно и надежно выполнять свои функции, обеспечивая заданный ресурс двигателя, только при точном соответствии его свойств тем термическим, механическим и химическим воздействиям, которым СМ подвергается в смазочной системе двигателя и на поверхностях смазываемых и охлаждаемых деталей. Современные моторные масла должны отвечать многим требованиям, в том числе:

- моющая, диспергирующе-стабилизирующая, пептизирующая и солюбилизирующая способности;
- термическая и термоокислительная стабильности;
- противоизносные свойства;
- отсутствие коррозионного воздействия на материалы деталей двигателя;
- стойкость к старению;
- пологость вязкостно-температурной характеристики;
- малая вспениваемость при высокой и низкой температурах.

При эксплуатации автомобиля под воздействием различных факторов СМ теряет

свои первоначальные свойства. Совокупность процессов, сопровождающихся изменением состава и свойств работающего СМ в неблагоприятном направлении, называют старением. Окисление углеводородов, срабатывание присадок, накопление в СМ продуктов неполного сгорания топлива, продуктов износа деталей, воды, пыли – вот основные процессы, происходящие при старении СМ. Характер и скорость старения зависят от уровня форсирования двигателей, температуры деталей, качества топлива и СМ, степени изношенности деталей и узлов, общего технического состояния автомобиля.

При старении СМ изменяются практически все основные показатели качества: вязкость, температура вспышки, коксуемость, содержание воды, щелочное число, кислотное число, содержание нерастворимого осадка, содержание продуктов износа.

Методика проведения исследования. В качестве объектов исследования были выбраны двигатели B5254T и B6324S, применяемые на автомобилях Volvo S80, XC70/V70, XC90, эксплуатируемых преимущественно в городском цикле и обслуживаемых в автосервисе ООО «БОВИД» с использованием оригинальных запасных частей и расходных материалов.

Условия, обеспечивающие чистоту проводимых исследований:

- все автомобили эксплуатируются в одинаковых условиях (качество топлива, ездовой цикл, качество обслуживания);
- для обслуживания используются запасные части и расходные материалы одного качества;
- технические характеристики исследуемых автомобилей примерно одинаковы.

В качестве СМ использовалось Castrol EDGE Professional 0W-30. Для анализа СМ применялись следующие методы:

- гранулометрический метод для определения общей загрязненности СМ при использовании фотометрического счетного анализатора механических примесей ГРАН-152;
- инфракрасная спектроскопия для определения химической деградации СМ, срабатываемости присадок при использовании ИК-спектрометра Bruker Alpha;
- феррографический анализ для определения изнашиваемых узлов по наличию специфици-

ческих частиц с использованием феррографической лаборатории T2FM Q500.

Технология отбора и подготовки проб.

Пробы СМ отбирали из исследуемых двигателей через каждые 20 000 км пробега автомобиля. При этом соблюдалась следующая последовательность действий:

- после приезда автомобиля на очередное ТО проводилось считывание информации с ЭБУ для подтверждения пробега;

- автомобиль устанавливался на подъемник и производился слив отработанного СМ через пробку в поддоне картера двигателя в сухие, чистые емкости объемом 0,5–0,6 л, при этом время между остановкой двигателя и сливом масла не превышало 5–10 минут для того, чтобы частицы загрязнений во время слива СМ находились во взвешенном состоянии и были равномерно распределены в масле;

- пробы СМ доставлялись в лабораторию, где проводилось исследование.

Двигатели B5254T и B6324S являются наиболее распространенными, часто встречающимися для автомобилей Volvo. Исследование СМ проводили на поверенном оборудовании. Технология отбора проб эксплуатационных СМ обеспечивает представительство образцов для анализа.

Результаты исследований, полученные гранулометрическим методом. По результатам испытаний были выведены средние значения для групп автомобилей по пробегу, по которым были построены зависимости количества частиц загрязнений в масле от пробега автомобиля (рисунок 1).

Исходя из результатов исследований, можно сделать вывод, что гранулометрический метод позволяет определить общую загрязненность СМ. При обнаружении повышенного содержания различных частиц в пробах необходимо перейти ко второму этапу диагностирования СМ – инфракрасной спектроскопии.

Результаты исследований, полученные методом инфракрасной спектроскопии. Метод ИК-спектроскопии позволяет проанализировать состояние органической части СМ: степень окисления, состояние антиокислительных и моющих диспергирующих присадок и продуктов их гидролиза.

Образец работавшего СМ представляет собой смесь различных химических соединений, присадок, продуктов разложения и загрязнения. ИК-спектр образца работавшего СМ является суммой спектров всех компонентов и состоит из большого числа перекрывающихся полос, которые трудно или невозможно интерпретировать. Первым шагом анализа является получение из спектра образца работавшего СМ дифференциального спектра сравнения, показывающего изменения, которые произошли в СМ по сравнению с исходным и содержащего спектры продуктов химического разложения и загрязнителей исключая спектры компонентов СМ, которые были истощены или растворены.

СМ, подвергаясь действию кислорода воздуха при повышенной температуре, окисляется с образованием различных соединений, большинство из которых содержит карбонильную группу. Продукты окисления способствуют увеличению кислотности СМ, истощая присадки и

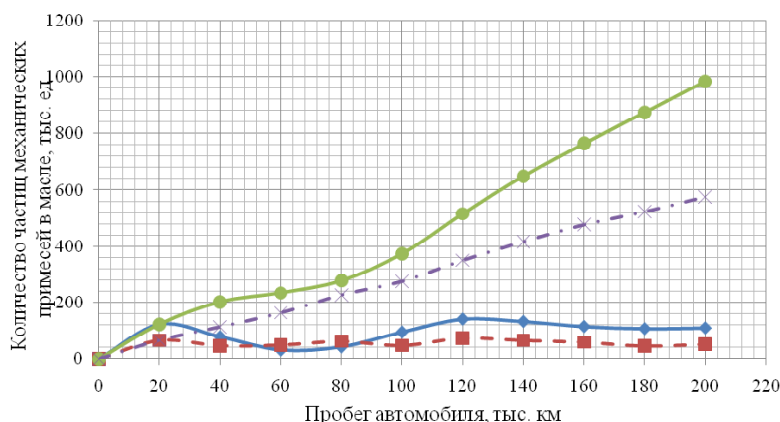


Рисунок 1. Зависимости количества частиц в СМ от пробега автомобиля и кривые суммарного количества частиц износа для двигателей B5454T и B6324S

содействуя коррозии. Окисление может также увеличить вязкость масла. Степень окисления является индикатором деградации масла.

Изменения в ИК-спектре в области 1720 см^{-1} свидетельствуют о возрастании содержания карбонильных соединений, накапливающихся в СМ в результате окислительных процессов.

При проведении эксперимента была исследована динамика изменения интенсивности поглощения на волновом числе 1720 см^{-1} в зависимости от пробега автомобиля для двигателей В5254Т и В6324S (рисунок 2).

В качестве антиокислительных присадок в исследуемых СМ используются алкилдитиофосфатные соединения. Их наличие можно идентифицировать по полосам поглощения на волновых числах $1000\text{--}1010\text{ см}^{-1}$. Анализ ИК-спектров рабочих СМ показал, что при увеличении пробега автомобиля уменьшаются интенсивности поглощения на волновых числах 1000 см^{-1} и возрастает степень окисления СМ.

На рисунке 3 представлена динамика изменения поглощения на волновом числе 1000 см^{-1} в зависимости от пробега автомобиля.

Примеры корреляционных кривых и их уравнения, полученные при сравнении результатов измерения щелочного числа и поглощения на волновых числах 1720 см^{-1} и 1000 см^{-1} , представлены на рисунках 4 и 5.

Таким образом, по поглощению в ИК-спектре в области волновых чисел 1000 см^{-1} и 1720 см^{-1} можно оценить состояние антиокислительных присадок и степень окисления моторного масла, сделать вывод о необходимости его замены.

Максимумы в ИК-спектрах на волновых числах 1172 и 1080 см^{-1} обусловлены поглощением сульфонатных групп моющих присадок. При образовании продуктов гидролиза моющих присадок в ИК-спектре эксплуатационного СМ

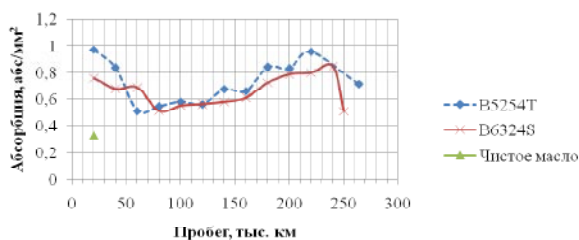


Рисунок 2. Динамика изменения поглощения на волновом числе 1720 см^{-1}

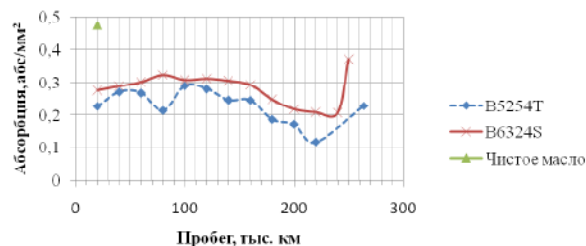


Рисунок 3. Динамика изменения поглощения на волновом числе 1000 см^{-1}

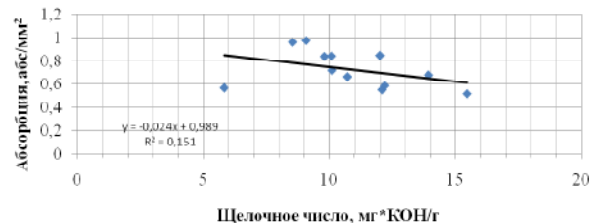


Рисунок 4. Корреляционная кривая, полученная при сравнении результатов измерения щелочного числа и поглощения на волновом числе 1720 см^{-1} для двигателя В5254Т

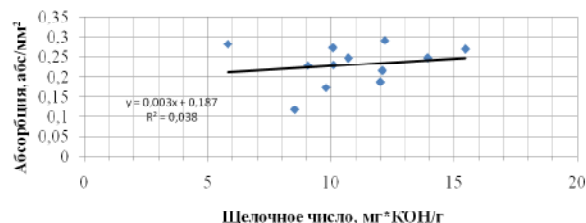


Рисунок 5. Корреляционная кривая, полученная при сравнении результатов измерения щелочного числа и поглощения на волновом числе 1000 см^{-1} для двигателя В5254Т

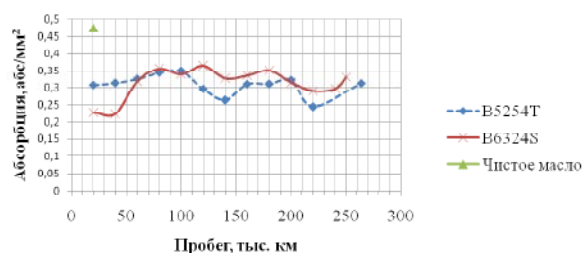


Рисунок 6. Динамика изменения поглощения на волновом числе 1172 см^{-1}

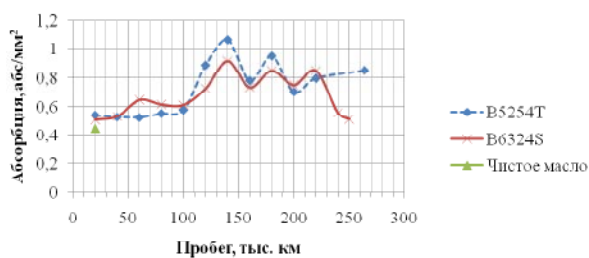


Рисунок 7. Динамика изменения поглощения на волновом числе 1140 см^{-1}

появляются полосы поглощения на волновых числах 1140 и 600 см^{-1} .

При проведении эксперимента было прослежено в зависимости от пробега автомобиля изменение величин абсорбции на волновых числах, характеризующих состояние моющих присадок и продуктов гидролиза сульфонатных присадок. Примеры представлены на рисунках 6 и 7.

Таким образом, по поглощению в ИК-спектре в области волновых чисел 1172 см^{-1} и 1140 см^{-1} можно оценить состояние моющих присадок и степень их разложения.

При попадании в СМ топлива и отработанных газов образуются органические нитраты RONO_2 , дающие в ИК-спектрах полосы поглощения в области волновых чисел 1640–1620 см^{-1} и 1285–1270 см^{-1} . Обнаружение попадания оксидов азота в СМ позволяет предсказать аварийную ситуацию на ранней стадии работы механизма.

На рисунке 8 представлен спектр свежего и рабочего СМ, в которых было обнаружено попадание продуктов неполного сгорания топлива, что, как выяснилось позднее при диагностике автомобиля, было следствием неисправности форсунки в 3 цилиндре и закоксовывания поршневых колец вследствие использования некачественного топлива (двигатель В5254Т, пробег автомобиля 60531 км). Интенсивное поглощение на волновых числах 1640 и 1285 см^{-1} свидетельствует об образовании органических нитратов вследствие попадания большого количества продуктов неполного сгорания топлива.

Таким образом, по результатам ИК-спектрального анализа можно обнаружить дефекты не только в работе поршневых колец в цилиндрах двигателя, но и в топливной системе.

Метод ИК-спектроскопии позволяет определить щелочность масла, характеризует изменение масла из-за воздействия неблагоприятных факторов и позволяет выявить отклонения в работе двигателя на ранней стадии.

На третьем этапе исследования применяется метод феррографического анализа СМ для определения изнашиваемых узлов по наличию специфических частиц.

Результаты исследований, полученные методом феррографии. В результате исследования отработанного СМ методом феррографии были выявлены возможные проблемы, представленные на рисунках 9–12.

Таким образом, по результатам феррографических исследований можно корректировать сроки замены масла, предупреждать выход из строя жизненно важных частей двигателя, производить мониторинг изнашивания двигателя и проводить техническое обслуживание для обеспечения безотказной работы двигателя на протяжении всего срока службы.

Заключение. Использование приведенной выше методики оценки состояния двигателей по результатам анализа смазочных материалов с использованием методов гранулометрическо-

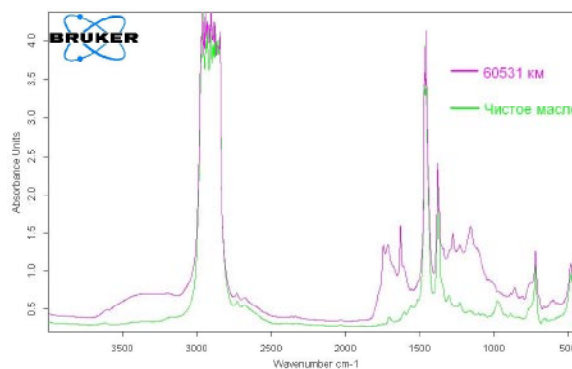
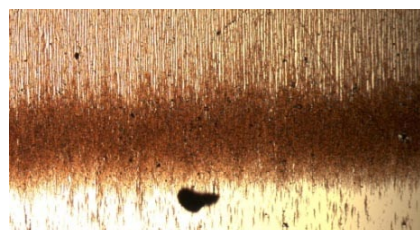


Рисунок 8. Спектр чистого и рабочего масел, в которых было обнаружено попадание продуктов неполного сгорания топлива



а)



б)

Рисунок 9. Аномально большое число частиц нормального износа (а – до нагрева, б – после нагрева до 540°C), пробег автомобиля: 60531 км, двигатель: В5254Т, причина: недостаток масла в двигателе



Рисунок 10. Частицы стали (а – до нагрева, б – после нагрева до 540°C), пробег автомобиля: 118515 км, двигатель: В5254Т, причина: износ коленчатого вала и/или распределительного вала и/или поршневых колец

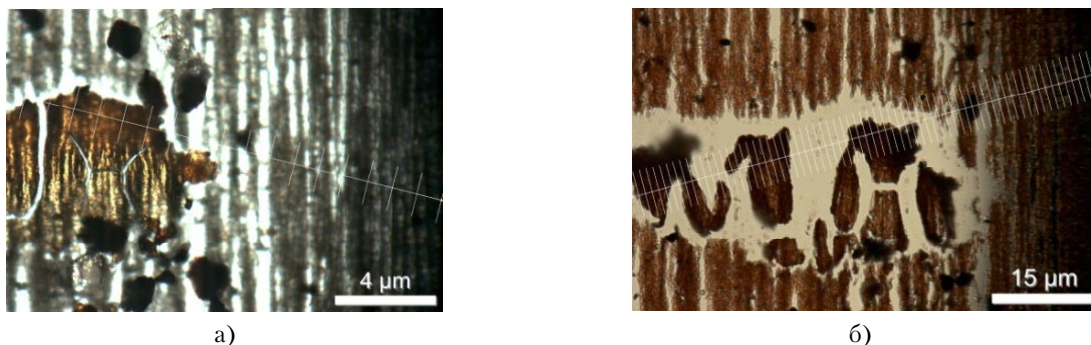


Рисунок 11. Частицы усталостного износа (а – до нагрева, б – после нагрева до 540°C), пробег автомобиля: 60531 км, двигатель: В5254Т, причина: недостаток масла в двигателе



Рисунок 12. Частицы красного оксида железа Fe₂O₃ после нагрева до 540°C (а – увеличение x500, б – увеличение x500), пробег автомобиля: 88362 км, двигатель: В5254Т, причина: попадание воды в масло

го анализа, феррографии и ИК-спектроскопии позволяет:

- оценить общий уровень загрязненности СМ;
- обнаружить прорыв газов в картер;
- обнаружить неисправности в топливной системе и в системе охлаждения;

- оценить степень срабатываемости антиокислительных присадок и диспергирующих присадок в моторных маслах;
- диагностировать двигатели и выявлять неисправности его узлов на ранней стадии, без выведения из эксплуатации.

11.02.2015

Представленная работа выполнена при поддержке РФФИ (проект НК-13-08-00875\14).

Список литературы:

1. Резников, В.Д. Анализ масла как средство диагностики двигателя / Резников В.Д., Мещерин Е.М. //Техника машиностроения. – 1997. – №3 (13). – С. 62-65.
2. Попова, Н.Н. Оценка окисляемости масел методом инфракрасной спектроскопии / Попова Н.Н. // М.: МИНХиГП, 1981. – 26 с.

3. Егорова, К.А. Исследование устойчивости к окислению некоторых минеральных масел методом ИК-спектроскопии / Егорова К.А. // Химия и технология топлив и масел. – 1996. – № 10.
4. Берестова, Г.И. Оценка состояния моторных масел в судовых дизелях комплексным методом феррографии и инфракрасной спектроскопии: дис. ... канд. техн. наук / Г.И. Берестова. – Мурманск, 2002. – 178 с.
5. Носова, Е.В. Метод замены моторных масел по фактическому состоянию: дис. канд. техн. наук / Е.В. Носова. – Иркутск, 1998. – 172 с.
6. Stachowiak, G.W. Ferrography and fractial analysis of contamination particles in unused lubrication oils / G.W. Stachowiak, T.B. Kirk, G.B. Stachowiak. // Tribology International. Issue 6, December 1991, pages 329-334.
7. Jonls, M.H. Ferrography applied to engine oil analysis / M.H. Jonls // Wear – 1999.
8. Baur, P.S. Ferrography. Machinery wear analysis with a predictable future / P.S. Baur // Power Magazine. – October, 1992.
9. Anderson, Daniel P. Wear Particle Atlas. – Spectro Inc., 2008. – 192 p.

Сведения об авторах:

Елена Анатольевна Задорожная, профессор кафедры автомобильного транспорта и сервиса автомобилей Южно-Уральского государственного университета, доктор технических наук, доцент,
e-mail: elena-nea@rambler.ru

Прохор Владимирович Оводов, магистрант Автотракторного факультета кафедры автомобильного транспорта и сервиса автомобилей Южно-Уральского государственного университета, e-mail: at353@mail.ru

454080, г. Челябинск, пр. В.И. Ленина, 76