

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКОГО МОТОРНОГО МАСЛА ПРИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Научная статья

Верещагин В.И.^{1,*}, Петров О.Н.², Афанасов В.И.³^{1,2,3} Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (valeri-2502[at]mail.ru)

Аннотация

В настоящей статье приведены результаты исследования полусинтетического моторного масла на предмет его сопротивляемости температурным воздействиям при изменении температуры и времени испытания. Построены графики показателей состояния моторного масла от времени испытания при различных температурах, которые позволяют определить влияние времени и температуры на величину показателей начала сопротивляемости температурным воздействиям.

Целью настоящих исследований является определение влияния температуры и времени на параметры сопротивляемости масла процессу температурной деструкции и окисления.

Для исследования выбрано оригинальное, полусинтетическое моторное масло Castrol Magnatec с классом вязкости 10W-40 Классификация ACEA: A3/B3, A3/B4. Спецификация API: SN. Масло автомобильное всесезонное предназначено для использования в бензиновых и дизельных двигателях автомобилей, эксплуатирующихся в современных условиях с частыми остановками. Масло образует на поверхности деталей прочную защитную пленку, которая снижает износ во время прогрева и обеспечивает защитный смазочный слой между парами трения.

Ключевые слова: оптическая плотность, окисление, испаряемость, время, сопротивляемость масла температурным воздействиям.

RESULTS OF RESEARCH ON CHANGES IN THE STATE OF SEMI-SYNTHETIC ENGINE OIL UNDER TEMPERATURE EFFECTS

Research article

Vereshchagin V.I.^{1,*}, Petrov O.N.², Afanasov V.I.³^{1,2,3} Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

* Corresponding author (valeri-2502[at]mail.ru)

Abstract

The present article gives the results of research of semisynthetic motor oil on its resistance to temperature effects at changing temperature and test time. The graphs of engine oil condition indicators on the test time at different temperatures are constructed, which allow to determine the influence of time and temperature on the value of indicators of the beginning of resistance to temperature effects.

The aim of the present research is to determine the effect of temperature and time on the parameters of oil resistance to the process of thermal degradation and oxidation.

The original, semisynthetic engine oil Castrol Magnatec with viscosity grade 10W-40 ACEA Classification: A3/B3, A3/B4. API specification: SN. All-season motor oil is intended for use in petrol and diesel engines of cars operating in modern conditions with frequent stops. The oil forms a strong protective film on the surface of parts, which reduces wear during warm-up and provides a protective lubricating layer between friction pairs.

Keywords: optical density, oxidation, evaporability, time, temperature resistance of oil.

Введение

Процессы температурной деструкции и окисления моторных масел являются причиной их старения. Эти процессы представляют собой сложные реакции углеводородов с кислородом, проходящие в несколько стадий [1]. Процесс окисления моторного масла проходит следующие стадии: на первой стадии происходит возбуждение химической реакции в молекулярных соединениях, в результате чего они разделяются на отдельные молекулярные элементы с образованием частиц – радикалов, содержащих неспаренный электрон. В следующей стадии отделившиеся элементы взаимодействуют с кислородом и образуются радикалы перекисей RO₂. Далее, радикалы перекисей вступают в реакции с исходными молекулами углеводородов, образуются углеводородные радикалы, молекулы гидрокислоты и сложные эфиры, которые увеличивают кислотность масла и оптическую плотность.

Для замедления реакций окисления, при производстве масел в масляную основу вводят антиокислительные присадки. Эти присадки препятствуют разрыву молекулярных соединений и образованию стабильных продуктов из радикалов и гидроперекисей [1], [2], [3], [5], [6].

Составить математическую модель процесса окисления масла очень сложно. Это связано с разнообразием химической структуры присадок и различиями в характере взаимодействия присадок с поверхностью деталей и продуктами окисления, поэтому для оценки способности масел противостоять процессу температурной деструкции и окисления применяются различные экспериментальные методы [7], [8], [9], [10], [11].

Методика исследования

В стеклянный стакан наливали масло до значения начальной массы $m_n = 100$ г. Массу контролировали с помощью электронных весов высокой точности. Стакан с маслом помещали в прибор для оценки эксплуатационных свойств масел. В приборе установлена мешалка для перемешивания масла, нагреватель и термомпара для контроля

температуры. Масло нагревали до температуры 150 °С при включенной мешалке. При достижении 150 °С нагрев прекращался и прибор переходил в автоматическое поддержание заданной температуры. Испытание продолжалось 6 часов. При испытании масла электрическая энергия, подводимая к прибору, преобразовывалась в тепловую энергию, которая расходовалась на нагрев масла с последующим парообразованием, потери тепла в атмосферу и протекание химических реакций, вызываемых нагреванием [5].

После 6-ти часов испытания стакан извлекали из прибора и взвешивали на электронных весах для определения значения конечной массы m_k . Далее вычисляли массу испарившегося масла G по формуле:

$$G = m_n - m_k, \quad (1)$$

где m_n – начальная масса, г; m_k – конечная масса, г.

Определяли коэффициент испаряемости K_G по формуле:

$$K_G = \frac{G}{m_n}, \quad (2)$$

где G – масса испарившегося масла, г.

Коэффициент испаряемости K_G является безразмерным, так как определяется отношением массы испарившегося масла к массе масла перед началом испытания [9].

Затем из стакана отбирали несколько капель масла для определения качества масла по его оптической плотности на фотометрическом анализаторе жидкости. Капли масла наносили на окно резьбовой пробки кюветы фотометрического анализатора жидкости, предварительно настроенного в соответствии с инструкцией по его эксплуатации, и измеряли фототок, прошедший через слой масла в кювете П.

По значению фототока П вычисляли оптическую плотность масла по формуле:

$$D = I g \frac{300}{\Pi} \quad (3)$$

где 300 – значение фототока прошедшего через кювету, в которой отсутствует масло, мкА; П – значение фототока, прошедшего через кювету, заполненную маслом, мкА.

Процессы испарения и протекания химических реакций при нагреве происходят одновременно, то есть эти процессы параллельные. На основании этого в настоящей работе используется коэффициент термоокислительной деструкции $\Pi_{ТОС}$ [13], вычисляемый по формуле:

$$\Pi_{ТОС} = D + K_G \quad (4)$$

Коэффициент термоокислительной деструкции вычисляется как сумма оптической плотности, характеризующей результат химических реакций в масле, и коэффициента испаряемости K_G , характеризующего процесс испарения.

После измерений масло из кюветы фотометрического анализатора жидкостей сливалось обратно в стеклянный стакан. Стакан снова взвешивался для определения значения начальной массы m_n . Далее, на приборе для оценки эксплуатационных свойств моторных масел устанавливалась следующая температура испытания, на 10 °С выше предыдущей.

Испытания проводились при температурах: 150, 160, 170 и 180 °С. Полный цикл испытаний прекращался при температуре 180 °С. Диапазон изменения температуры от 150 до 180 °С называется циклом увеличения температуры, а диапазон изменения температуры от 180 до 150 °С – циклом понижения температуры. После полного испытания масла в цикле увеличения температуры начиналось испытание новой пробы масла в цикле понижения температуры по той же технологии.

Температурный диапазон от 150 до 180 °С выбран в связи с тем, что при температурах от 140 до 160 °С распадаются антиокислительные присадки алкильного типа, используемые в моторных маслах, и поэтому при температурах от 150 до 180 °С интенсифицируется процесс деструкции.

По аналогичным технологиям исследуемое масло испытывалось при другой продолжительности испытания, которая составляла 10 часов.

По полученным данным в настоящей работе введен показатель состояния масла Q , который учитывает изменение величин D и K_G при циклическом изменении температуры T и времени испытания t .

Для оптической плотности D и коэффициента испаряемости K_G величину показателя состояния масла Q предложено вычислять формулами:

– отдельно для оптической плотности:

$$Q_D = TtD, \quad (5)$$

– отдельно для коэффициента испаряемости:

$$Q_G = TtK_G, \quad (6)$$

– общий показатель состояние масла с учётом изменения оптической плотности и коэффициента испаряемости вычислять по формуле:

$$Q_{\Pi_{ТОС}} = Tt\Pi_{ТОС} \quad (7)$$

Для упрощения трудоёмких вычислений в настоящей статье применяется логарифмирование функций. По полученным результатам исследований определялись изменения показателей состояния масла и строились графики функций этих показателей от времени испытания в циклах увеличения и понижения температуры. По графикам функций устанавливалась связь между величинами D , K_G и $\Pi_{ТОС}$ и временем испытания t [14], [15].

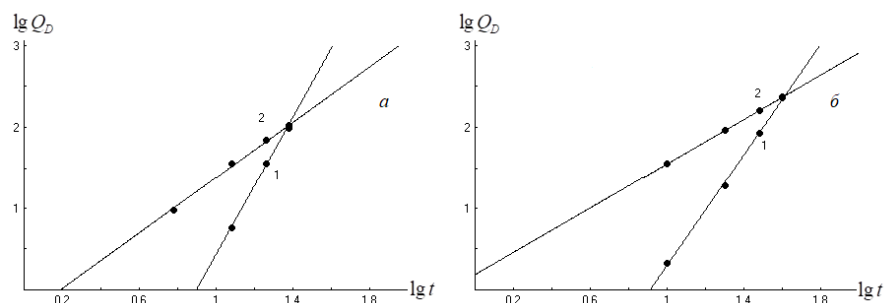


Рисунок 1 - Графики функции показателей состояния масла, определяемые продуктами окисления от времени в логарифмических координатах:
а – время испытания 6 часов, б – время испытания 10 часов

Примечание: 1 – цикл увеличения температуры от 150 до 180 °С; 2 – цикл понижения температуры от 180 до 150 °С

В логарифмическом измерении графики описываются линейными функциями.

Уравнения функций для времени испытания 6 часов имеют следующий вид:

– цикл увеличения температуры, (прямая 1):

$$\lg Q_D = 4,2083 \cdot (\lg t - 0,9); \quad (8)$$

– цикл понижения температуры, (прямая 2):

$$\lg Q_D = 1,7456 \cdot (\lg t - 0,24), \quad (9)$$

где 4,2083 и 1,7456 – коэффициенты, соответствующие скорости изменения показателя состояния масла, определяемого продуктами окисления, ед/ч;

0,9 и 0,24 – коэффициенты, соответствующие времени начала изменения показателя состояния масла, ч.

Уравнения функций для времени испытания 10 часов представлены ниже:

– цикл увеличения температуры, (прямая 1):

$$\lg Q_D = 3,3714 \cdot (\lg t - 0,90); \quad (10)$$

– цикл понижения температуры, (прямая 2):

$$\lg Q_D = 1,4188 \cdot (\lg t + 0,1), \quad (11)$$

где коэффициенты 3,3714; 1,4188; 0,9 и 0,1 имеют аналогичное значение, что и при 6 часах испытания.

При анализе графиков функций и уравнений установлено, что в цикле увеличения температуры испытания скорость изменения показателя состояния масла выше при испытании исследуемого масла в течение 6-ти часов, чем в течение 10-ти часов. При этом, необходимо отметить, что время начала изменения показателя состояния масла $\lg Q_D$ не зависит от времени испытания и составляет 7,94 часа (антилогарифм $\lg t=0,9$).

В цикле понижения температуры испытания скорость изменения показателя состояния от времени испытания также выше при 6-ти часах испытания масел, чем при 10-ти часах и составляет:

– при 6-ти часах – 1,7456 ед/ч;

– при 10-ти часах – 1,4188 ед/ч.

Время начала изменения показателя состояния масла в логарифмическом измерении в цикле понижения температуры при 6-ти часах испытания составляет 1,74 часа (антилогарифм $\lg t=0,24$).

Если приравнять уравнения (8) и (9), и уравнения (10) и (11), то можно определить координаты точек пересечений графиков за время испытаний 6 часов и время испытания 10 часов показателя состояния масла, определяемого продуктами окисления от времени испытания, полученных в циклах увеличения и понижения температуры.

Имеем, для времени испытания 6 часов:

$$4,2083 \cdot (\lg t - 0,9) = 1,7456 \cdot (\lg t - 0,24). \quad (12)$$

В результате решения равенства (12) получилось значение десятичного логарифма времени $\lg 1,3678$, что соответствует времени 23,32 часа.

Аналогично – для времени испытания 10 часов:

$$3,3714 \cdot (\lg t - 0,9) = 1,4188 \lg t + 0,1 \quad (13)$$

получилось значение десятичного логарифма времени $\lg 1,6052$ или 40,29 часа.

Полученные значения времени свидетельствуют о том, что точка пересечения прямых на графике при 6-ти часах испытания соответствует значению времени 23,32 ч, что меньше чем 40,29 ч полученных при 10-ти часах испытания, т.е., в 1,73 раза. Этот результат позволяет оценить, насколько изменится показатель состояния масла, соответствующий точкам пересечения графиков функций увеличения и понижения температуры испытания. Для этого подставим значения десятичного логарифма времени $\lg 1,3678$ в одно из уравнений (8) или (9) для времени испытания 6 часов, а $\lg 1,6052$ – в одно из уравнений (10) или (11) для времени испытания 10 часов:

$$\lg Q_D = 4,2083(\lg 1,3678 - 0,9) = 1,9686; \quad (14)$$

$$\lg Q_D = 3,3714(\lg 1,6052 - 0,9) = 2,378. \quad (15)$$

Получаем координаты точек пересечения прямых показателя состояния масла, определяемого продуктами окисления – для времени испытания 6 часов $\lg Q_D=1,9686$, что соответствует $Q_D=93,03$ ед, а для времени испытания 10 часов – $\lg Q_D=2,378$, что соответствует $Q_D=238,78$ ед.

Полученные значения свидетельствуют о том, что показатель состояния масла, определяемого продуктами окисления, соответствующий точке пересечения графиков функций 6-ти часовых и 10-ти часовых испытаний увеличился с 93,03 ед при 6-ти часах испытания до 238,78 ед при 10-ти часах испытания, т.е., в 2,58 раза.

На рис. 2 показаны графики функций десятичного логарифма показателя состояния масла, определяемого продуктами испарения, от времени (шесть и десять часов соответственно) в циклах увеличения и понижения температуры.

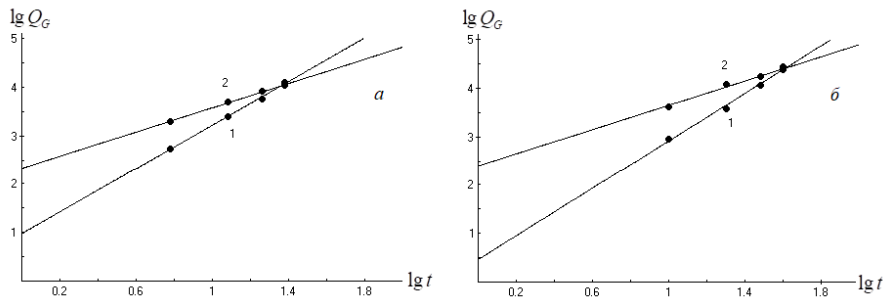


Рисунок 2 - Графики функции показателей состояния масла, определяемые продуктами испарения от времени в логарифмических координатах:
а – время испытания 6 часов, б – время испытания 10 часов

Примечание: 1 – цикл увеличения температуры от 150 до 180 °С; 2 – цикл понижения температуры от 180 до 150 °С

Установлено, что графики описываются линейными функциями. Уравнения функций для времени испытания 6 часов имеют следующий вид:

– цикл увеличения температуры, (прямая 1):

$$\lg Q_G = 2,2464 \lg t + 1,0, \quad (16)$$

– цикл понижения температуры, (прямая 2):

$$\lg Q_G = 1,3406 \lg t + 2,25. \quad (17)$$

где 2,2464, 1,3406 – коэффициенты, соответствующие скорости изменения показателя состояния масла, определяемого продуктами окисления, ед/ч; 1,0 и 2,25 – коэффициенты, соответствующие времени начала изменения показателя состояния масла, ч.

Уравнения функций для времени испытания 10 часов представлены ниже:

– цикл увеличения температуры, (прямая 1):

$$\lg Q_G = 2,5063 \lg t + 0,43; \quad (18)$$

– цикл понижения температуры, (прямая 2):

$$\lg Q_G = 1,3125 \lg t + 2,27, \quad (19)$$

где коэффициенты 2,5063; 1,3125; 0,43 и 2,27 имеют аналогичное значение, что и при 6 часах испытания.

При анализе графиков функций и уравнений установлено, что в цикле увеличения температуры испытания скорость изменения показателя состояния масла выше при испытании исследуемого масла в течение 6-ти часов, чем в течение 10-ти часов, соответственно 2,5063 ед/ч против 2,2464 ед/ч. В цикле понижения температуры испытания скорость показателя состояния масла $\lg Q_G$ выше при 6-ти часовых испытаниях, чем при 10-ти часовых испытаниях, соответственно 1,3406 ед/ч против 1,3125 ед/ч. Причем в циклах повышения температуры значения $\lg Q_G=0,43$ ед при 10-ти часовых испытаниях меньше, чем $\lg Q_G=1,00$ ед при 6-ти часовых. В циклах понижения температуры эти значения практически одинаковы, соответственно $\lg Q_G=2,25$ ед и $\lg Q_G=2,27$ ед.

Если приравнять уравнения (16) и (17) и уравнения (18) и (19), то можно определить координаты точек показателя состояния масла, определяемого продуктами испарения, от времени испытания, полученных в циклах увеличения и понижения температуры.

Имеем, для времени испытания 6 часов:

$$2,2464 \lg t + 1,0 = 1,3406 \lg t + 2,25 \quad (20)$$

В результате решения равенства (20), получилось значение десятичного логарифма времени $\lg 1,38$, что соответствует времени 24 часа.

Аналогично – для времени испытания 10 часов:

$$2,5063lgt + 0,43 = 1,3125lgt + 2,27, \quad (21)$$

получилось значение десятичного логарифма времени $lg 1,5413$ или 34,78 часа. Полученные значения времени свидетельствуют о том, что время пересечения прямых при 6-ти часах испытания составило 24 ч и увеличилось до 34,78 ч при 10-ти часах испытания, т.е., в 1,45 раза.

Этот результат позволяет оценить, насколько изменится показатель состояния масла, определяемый продуктами испарения, соответствующий точкам пересечения графиков функций увеличения и понижения температуры испытания. Для этого подставим значения десятичного логарифма времени $lg 1,38$ в одно из уравнений (16) ил (17) для времени испытания 6 часов, а $lg 1,5413$ – в одно из уравнений (18) или (19) для времени испытания 10 часов:

$$lgQ_G = 2,2464lg1,38 + 1 + 4,1; \quad (22)$$

$$lgQ_G = 2,5063lg1,5413 + 0,43 = 4,293. \quad (23)$$

Получаем координаты точек пересечения прямых показателя состояния масла, определяемого продуктами окисления – для времени испытания 6 часов $lgQ_G=4,1$, что соответствует $Q_G=12589,25$ ед, а для времени испытания 10 часов – $lgQ_G=4,293$, что соответствует $Q_G=19633,6$ ед.

Полученные значения свидетельствуют о том, что показатель состояния масла, определяемого продуктами испарения, соответствующий точке пересечения графиков функций 6-ти часовых и 10-ти часовых испытаний при 6-ти часах испытания составил 12589,25 ед и увеличилось до 19633,6 ед при 10-ти часах испытания, т.е., в 1,56 раза.

На рис. 3 показаны графики показателя состояния масла, определяемого с учётом изменения оптической плотности и испаряемости, от времени испытания (шесть и десять часов соответственно) в циклах увеличения и понижения температуры.

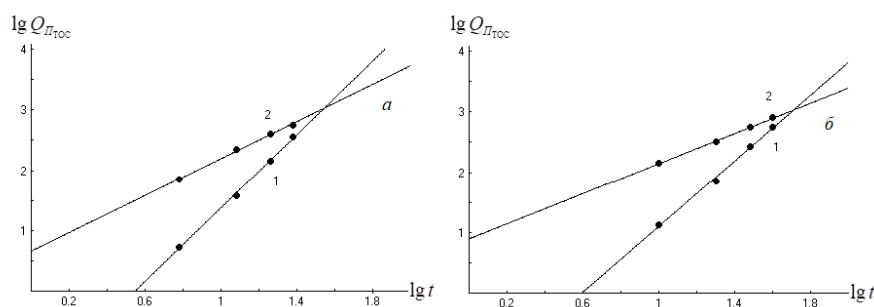


Рисунок 3 - Графики функции показателей общего состояния масла, определяемого продуктами окисления и испарения от времени в логарифмических координатах:

a – время испытания 6 часов; *б* – тоже масло время испытания 10 часов

Примечание: 1 – цикл увеличения температуры от 150 до 180 °C; 2 – цикл понижения температуры от 180 до 150 °C

Графики описываются линейными функциями. Уравнения функций для времени испытания 6 часов имеют следующий вид:

– цикл увеличения температуры, (прямая 1):

$$lgQ_{ПТОС} = 3,122 \cdot (lgt - 0,56) \quad (24)$$

- цикл понижения температуры, (прямая 2):

$$lgQ_{ПТОС} = 1,5581lgt + 0,6 \quad (25)$$

где 3,122 и 1,558 – коэффициенты, соответствующие скорости изменения показателя состояния масла, определяемого продуктами окисления, ед/ч; 0,56 и 0,6 – коэффициенты, соответствующие времени начала изменения показателя состояния масла, ч.

Уравнения функций для времени испытания 10 часов представлены ниже:

– цикл повышения температуры, (прямая 1):

$$lgQ_{ПТОС} = 2,75 \cdot (lgt - 0,6); \quad (26)$$

- цикл понижения температуры, (прямая 2):

$$lgQ_{ПТОС} = 1,2813lgt + 0,85. \quad (27)$$

где коэффициенты 2,75; 1,283; 0,6 и 0,85 имеют аналогичное значение, что и при 6 часах испытания.

При анализе графиков функций и уравнений установлено, что в циклах увеличения и понижения температуры испытания скорость показателя общего состояния масла $lgQ_{ПТОС}$ выше при испытании исследуемого масла при 6-ти часах испытания при каждой температуре, чем при 10-ти часах испытания. При этом значение показателя общего состояния масла, соответствующего $lgt = 0$ в циклах понижения температуры испытания 6-часовых испытаниях

меньше, чем при 10-часовых испытаниях. Если приравнять уравнения (24) и (25), и уравнения (26) и (27), то можно определить координаты точек пересечений графиков показателя общего состояния масла от времени испытания, полученных в циклах повышения и понижения температуры. Имеем, для времени испытания 6 часов:

$$3,122 \cdot (lgt - 0,56) = 1,558lgt + 0,6. \quad (28)$$

В результате решения равенства (28) получилось значение десятичного логарифма времени $lg1,501$, что соответствует времени 31,7 часа.

Аналогично – для времени испытания 10 часов:

$$2,75 \cdot (lgt - 0,6) = 1,2813lgt + 0,85. \quad (29)$$

получилось значение десятичного логарифма времени $lg1,702$ или 50,35 часа.

Полученные значения времени свидетельствуют о том, что время пересечения прямых при 6-ти часах испытания составило 31,7 ч и увеличилось до 50,35 ч при 10-ти часах испытания, т.е., в 1,59 раза. Этот результат позволяет оценить, насколько изменится показатель общего состояния масла, соответствующий точкам пересечения графиков функций повышения и понижения температуры испытания. Для этого подставим значения десятичного логарифма времени $lg1,501$ в одно из уравнений (24) или (25) для времени испытания 6 часов, а $lg1,702$ – в одно из уравнений (26) или (27) для времени испытания 10 часов:

$$lgQ_{ПТОС} = 3,122 \cdot (1,501 - 0,56) = 2,938; \quad (30)$$

$$lgQ_{ПТОС} = 2,75 \cdot (1,702 - 0,6) = 3,031. \quad (31)$$

Получаем координаты точек пересечения прямых общего показателя состояния масла – для времени испытания 6 часов $lgQ_{ПТОС} = 2,938$, что соответствует $Q_{ПТОС} = 866,96$ ед, а для времени испытания 10 часов – $lgQ_{ПТОС} = 3,031$, что соответствует $Q_{ПТОС} = 1072,75$ ед.

Полученные значения свидетельствуют о том, что показатель общего состояния масла, соответствующий точке пересечения графиков функций 6-ти часовых и 10-ти часовых испытаний увеличился с 866,96 ед при 6-ти часах испытания до 1072,75 ед. при 10-ти часах испытания, т.е., в 1,24 раза.

Заключение

В процессе проведенных экспериментальных исследований разработаны практические рекомендации по:

- технологии определения времени начала деструкции моторного масла и скорости его старения, включающей нагрев масла в определенном температурном интервале с последующим измерением показателей его сопротивляемости внешним воздействиям, вычисление значений общего показателя состояния масла, построение графических зависимостей изменения общего показателя состояния масла от времени, позволяющих в динамике оценить скорость старения масла и изменение его сопротивляемости температурным и окислительным воздействиям;
- сравнению различных масел одного назначения по параметрам сопротивляемости процессу температурной деструкции и окисления с учетом общего показателя состояния масла, т.е., чем выше значение общего показателя состояния масла $Q_{ПТОС}$, тем хуже состояние масла, а соответственно ниже его сопротивляемость температурным и окислительным воздействиям.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Верещагин В.И. Методы контроля и результаты исследования состояния трансмиссионных и моторных масел при их окислении и триботехнических испытаниях / В.И. Верещагин, В.С. Янович, Б.И. Ковальский [и др]. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. — 208 с.
2. Кондаков Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем / Л.А. Кондаков. — М.: Машиностроение, 1982. — 216 с.
3. Аксенов А.Ф. Применение авиационных технических жидкостей / А.Ф. Аксенов, А.А. Литвинов. — М.: Транспорт, 1974. — 156 с.
4. Нефтепродукты. Свойства, качество, применение: Справочник / Под ред. Б.В. Лосикова. — М.: Химия, 1966. — 776 с.
5. Шишков И.Н. Авиационные горюче смазочные материалы и спец. жидкости / И.Н. Шишков, В.Б. Белов. — М.: Транспорт, 1979. — 247 с.
6. Кужаров А.С. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении / А.С. Кужаров, С.Б. Булгаревич, А.А. Кужаров // Трение и износ. — 2002. — Т. 23. — № 6. — С. 645-651.
7. Ковальский Б.И. Метод определения показателей термоокислительной стабильности моторных масел и их температурной области / Б.И. Ковальский, Н.Ю. Безбородов, В.И. Верещагин [и др.] // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2019. — Вып. 9. — С. 9-14

8. Рябинин А.А. Метод определения энергетической связи продуктов температурной стойкости смазочных материалов / А.А. Рябинин, Н.Н. Лысянникова, М.И. Плахотникова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2022. — № 3. — С. 32-38
9. Ефремова Е.А. Результаты исследования влияния процессов окисления на вязкостно-температурные характеристики частично синтетических моторных масел / Е.А. Ефремова, Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов // Известия орловского государственного технического университета. — 2021. — № 5 (349). — С. 9-14.
10. Ковальский Б.И. Графо-аналитический метод определения показателей термоокислительной стабильности моторного масла Роснефть Максимум 10W-40 / Б.И. Ковальский, Д.В. Агровиченко, А.Н. Сокольников // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2017. — № 5. — С. 175-182
11. Ковальский Б.И. Метод контроля влияния температуры на процессы окисления минеральных моторных масел / Б.И. Ковальский, Е.К. Кравцова, Ю.Н. Безбородов [и др.] // Известия тульского государственного университета. Технические науки. — 2014. — № 3. — С. 58-69
12. Ковальский Б.И. Фотометрический анализатор жидкостей / Б.И. Ковальский, Г.М. Сорокин, Н.А. Яворский. — 1981. — Бюл. № 28.
13. Ковальский Б.И. Метод определения показателей термоокислительной стабильности моторных масел и их температурной области / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, В.Г. Шрам [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2019. — Вып. 9. — С. 434-439.
14. Ковальский Б.И. Результаты исследования влияния времени испытания на температурные показатели работоспособности моторных масел / Б.И. Ковальский, В.А. Баясников, Е.А. Ермилов [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2017. — № 2 (120). — С. 115-122
15. Ковальский Б.И. Метод определения предельно допустимых показателей работоспособности смазочных масел / Б.И. Ковальский, В.И. Верещагин, В.Г. Шрам [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 2 (30). — С. 34-40

Список литературы на английском языке / References in English

1. Vereshhagin V.I. Metody kontrolja i rezul'taty issledovanija sostojanija transmissionnyh i motornyh masel pri ih okislenii i tribotekhnicheskijh ispytaniyah [Control Methods and Results of Research of Transmission and Engine Oils Condition at Their Oxidation and Tribotechnical Tests] / V.I. Vereshhagin, V.S. Janovich, B.I. Koval'skij [et al.]. — Krasnoyarsk: Sib. Feder. Un-ty, 2017. — 208 p. [in Russian]
2. Kondakov L.A. Rabochie zhidkosti i uplotnenija gidravlicheskih sistem [Hydraulic Fluids and Seals] / L.A. Kondakov. — M.: Mashinostroenie, 1982. — 216 p. [in Russian]
3. Aksenov A.F. Primenenie aviacionnyh tehnikeskijh zhidkostej [Application of Aviation Technical Fluids] / A.F. Aksenov, A.A. Litvinov. — M.: Transport, 1974. — 156 p. [in Russian]
4. Nefteprodukty. Svoystva, kachestvo, primenenie: Spravochnik [Petroleum Products. Properties, Quality, Application: Reference book] / Ed. by B.V. Losikov. — M.: Himija, 1966. — 776 p. [in Russian]
5. Shishkov I.N. Aviacionnye gorjuče smazochnye materialy i spec. zhidkosti [Aviation Fuels, Lubricants and Speciality Fluids] / I.N. Shishkov, V.B. Belov. — M.: Transport, 1979. — 247 p. [in Russian]
6. Kuzharov A.S. Molekuljarnye mehanizmy samoorganizacii pri trenii [Molecular Mechanisms of Self-Organisation at Friction] / A.S. Kuzharov, S.B. Bulgarevich, A.A. Kuzharov // Trenie i iznos [Friction and Wear]. — 2002. — Vol. 23. — № 6. — P. 645-651. [in Russian]
7. Koval'skij B.I. Metod opredelenija pokazatelej termookislitel'noj stabil'nosti motornyh masel i ih temperaturnoj oblasti [A Method for Determination of Thermo-Oxidative Stability Indices of Motor Oils and Their Temperature Region] / B.I. Koval'skij, N.Ju. Bezborodov, V.I. Vereshhagin [et al.] // Izvestija TulGU. Tehniceskie nauki [Proceedings of TulSU. Technical Sciences]. — 2019. — Iss. 9. — P. 9-14 [in Russian]
8. Rjabinin A.A. Metod opredelenija jenergetičeskoj svjazi produktov temperaturnoj stojkosti smazochnyh materialov [Method for Determination of Energy Relationship of Temperature Resistance Products of Lubricants] / A.A. Rjabinin, N.N. Lysjannikova, M.I. Plahotnikova // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. — 2022. — № 3. — P. 32-38 [in Russian]
9. Efremova E.A. Rezul'taty issledovanija vlijanija processov okislenija na vjazkostno-temperaturnye harakteristiki chastično sinteticheskijh motornyh masel [Results of the Study of the Influence of Oxidation Processes on the Viscosity-Temperature Characteristics of Partially Synthetic Motor Oils] / E.A. Efremova, B.I. Koval'skij, Ju.N. Bezborodov // Izvestija orlovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Proceedings of Oryol State Technical University]. — 2021. — № 5 (349). — P. 9-14. [in Russian]
10. Koval'skij B.I. Grafo-analiticheskij metod opredelenija pokazatelej termookislitel'noj stabil'nosti motornogo masla Rosneft' Maksimum 10W-40 [Graph-analytical Method of Determination of Thermo-oxidative Stability Indices of Rosneft Maximum 10W-40 Motor Oil] / B.I. Koval'skij, D.V. Agrovichenko, A.N. Sokol'nikov // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. — 2017. — № 5. — P. 175-182 [in Russian]
11. Koval'skij B.I. Metod kontrolja vlijanija temperatury na processy okislenija mineral'nyh motornyh masel [Control Method of Temperature Influence on Oxidation Processes of Mineral Motor Oils] / B.I. Koval'skij, E.K. Kravcova, Ju.N. Bezborodov [et al.] // Izvestija tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. — 2014. — № 3. — P. 58-69 [in Russian]
12. Koval'skij B.I. Fotometricheskij analizator zhidkostej [Photometric Liquid Analyser] / B.I. Koval'skij, G.M. Sorokin, N.A. Javorskij. — 1981. — Bul. № 28. [in Russian]
13. Koval'skij B.I. Metod opredelenija pokazatelej termookislitel'noj stabil'nosti motornyh masel i ih temperaturnoj oblasti [Method for Determination of Thermo-oxidative Stability Indices of Motor Oils and Their Temperature Region] / B.I.

Koval'skij, Ju.N. Bezborodov, V.G. Shram [et al.] // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. — 2019. — Iss. 9. — P. 434-439. [in Russian]

14. Koval'skij B.I. Rezul'taty issledovanija vlijanija vremeni ispytaniya na temperaturnyye pokazateli rabotosposobnosti motornyh masel [Results of Research of Influence of Test Time on Temperature Indicators of Motor Oil Serviceability] / B.I. Koval'skij, V.A. Baljasnikov, E.A. Ermilov [et al.] // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. — 2017. — № 2 (120). — P. 115-122 [in Russian]

15. Koval'skij B.I. Metod opredelenija predel'no dopustimyh pokazatelej rabotosposobnosti smazochnyh masel [Method for Determination of Maximum Permissible Serviceability Indices of Lubricating Oils] / B.I. Koval'skij, V.I. Vereshhagin, V.G. Shram [et al.] // Juzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik [South-Siberian Scientific Bulletin]. 2020. № 2 (30). — P. 34-40 [in Russian]