

В. С. Даниленко, Б. И. Ковальский, Е. А. Вишневецкая, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Ананьин

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПЫТАНИЯ

Приведена методика испытания смазочных масел на термоокислительную стабильность при циклическом изменении температуры, предложены критерии оценки влияния температуры испытания на процессы окисления и влияния продуктов окисления на вязкость испытываемого масла.

Ключевые слова: термоокислительная стабильность, коэффициент поглощения светового потока, вязкость, летучесть, коэффициент энергии превращения.

Наземное обеспечение полетов авиации – важнейший фактор надежности эксплуатации воздушных судов, безопасности полетов и бесперебойного режима перевозок.

Механическое состояние и жесткий режим контроля эксплуатационных параметров средств, обеспечивающих подготовку воздушных судов к полету, имеют первостепенное значение для технических наземных служб. Достаточно большой и разнообразный по назначению арсенал специальной техники нуждается в оперативных и эффективных методах контроля за состоянием силовых установок и трансмиссий. Одним из таких методов предполагается контроль смазочных материалов, применяемых в них как индикатор технического состояния самого агрегата.

Важное значение при исследовании процессов старения смазочных масел занимают вопросы изучения кинетики окислительных процессов, протекающих в основном на поверхностях трения в тонких слоях под действием высоких температур. Эти факторы оказывают существенное влияние на изменение свойств смазочного материала и формирование защитных граничных слоев. В этой связи представляют практическое и научное значение исследования механизма окисления и влияния продуктов окисления на ресурс моторных масел; изменения моющих диспергирующих свойств и вязкости в процессе окисления; состава продуктов окисления.

Решение этих задач позволит формализовать основные подходы к разработке методов и средств контроля и состояния моторных масел в период эксплуатации ДВС, выявить основные закономерности окислительных процессов и их зависимость от широкого диапазона температур испытания.

Отличительной особенностью разработанной методики исследования термоокислительной стабильности является испытания моторных масел при циклическом изменении температуры испытания, что позволяет их сравнивать по количеству выдержавших циклов. Для исключения влияния металлов на окислительные процессы проба масла массой $100 \pm 0,1$ г испытывалась в стеклянном стакане и перемешивалась стеклянной мешалкой с частотой 300 ± 2 об/мин. Температура испытания задавалась дискретно в диапазоне от 150 до 180 °C через 10 °C в сторону ее увеличения и уменьшения, а во время испытания поддерживалась автоматически с точностью ± 1 °C. Время испытания при выбранной температуре составляло 6 ч. После каждого испытания стакан с исследуемым маслом взвешивался на электронных весах для определе-

ния летучести масла за 6 ч. испытания при заданной температуре, что позволяло определить температуру, при которой летучесть была минимальной.

После взвешивания отбиралась проба окисленного масла для фотометрирования и определения коэффициента поглощения светового потока и вязкости. Термоокислительная стабильность устанавливалась по изменениям коэффициента поглощения светового потока (K_n), вязкости (μ) и летучести (G) в зависимости от времени и температуры испытания.

Достоверность результатов окисления моторных масел оценивалась по сопоставимости трехкратных испытаний.

Разработанная методика исследования позволила получить зависимости интенсивности процесса окисления, обосновать энергетический критерий и его связь с концентрацией продуктов окисления, а также установить различия в процессах окисления минеральных, частично синтетических и синтетических масел (рис. 1–3).

Зависимость изменения коэффициента поглощения светового потока K_n , относительной вязкости K_m и летучести G от температуры испытания, при которых значения этих параметров изменялись минимально, т. е. процессы окисления практически останавливались, представлены на рис. 1. Количество циклов, выдержавших испытываемые масла до определенного значения коэффициента K_n (рис. 1, а), позволяет сравнивать их по потенциальному ресурсу в выбранном диапазоне температур.

Пусковые свойства моторных масел определяются по характеру изменения вязкости $K_m = f(T)$ и летучести $G = f(T)$. Чем меньше интенсивность изменения этих параметров от температуры, тем выше пусковые свойства испытываемого масла.

Склонность моторных масел к окислению при циклическом изменении температуры испытания оценивалась по зависимости $K_n = f(t)$ (рис. 2).

Представленные зависимости подтверждают влияние базовой основы на окислительные процессы. Так, минеральное масло М-10-Г₂К (кривая 1) и частично синтетическое Visco 3 000 SL/CF (кривая 2) характеризуются высокой интенсивностью окисления, а частично синтетическое масло Zic 5000 5W-40 CL-4 (кривая 3) и синтетическое Castrol GTX 0W-30 SL/CF (кривая 7) – наименьшей интенсивностью. По данным зависимостям можно сравнивать моторные масла по группам эксплуатационных свойств, ресурсу и склонности их к загрязнению масляных систем двигателей.

Летучесть моторных масел выражена коэффициентом летучести K_G , определяемым отношением испарившейся части пробы масла при испытании к оставшейся массе пробы. Зависимости коэффициента K_G от времени испытания при циклическом изменении температуры представлены на рис. 3. Наибольшей летучестью обладает масло Mobil Syntis 5W-40 SL/CF (кривая 5), а наименьшей минеральное масло М-10-Г₂к (кривая 1) и синтетическое масло Castrol GTX 0W-30 SL/CF (кривая 7).

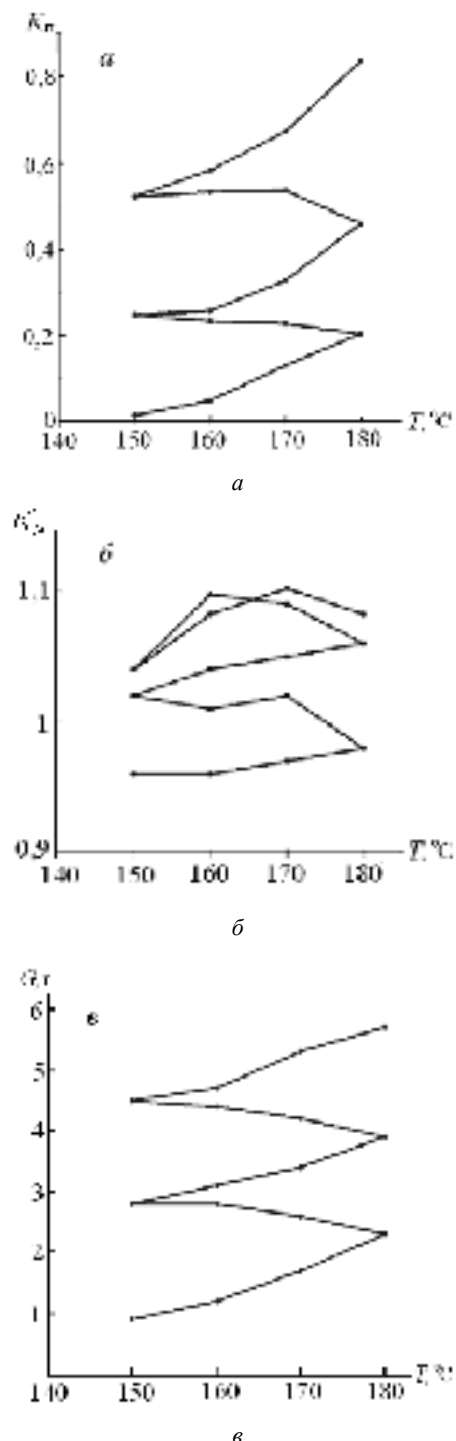


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения светового потока: K_n (а), относительной вязкости K_v (б), летучести G (е) от температуры испытания минерального моторного масла М-10-Г₂к (толщина фотометрируемого слоя 2 мм)

Исходя из принципа самоорганизации коллоидных систем смазочный материал не может бесконечно поглощать тепловую энергию, поэтому часть ее преобразуется в продукты окисления и испарения. В этой связи энергия превращения E_n может определяться как сумма коэффициентов поглощения светового потока K_n и летучести K_G :

$$E_n = K_n + K_G \quad (1)$$

Значение энергии превращения зависит от базовой основы моторного масла, группы эксплуатационных свойств, времени и температуры испытания (рис. 4). Так, минеральное масло Visco 3000 10W-40 SL/CF (кривая 2) преобразует наибольшее количество тепловой энергии за короткий период времени, а частично синтетическое масло Zic 5000 5W-40 CL-4 (кривая 3) и синтетическое Castrol GTX 0W-30 SL/CF (кривая 7) – наименьшее за 300 ч испытания.

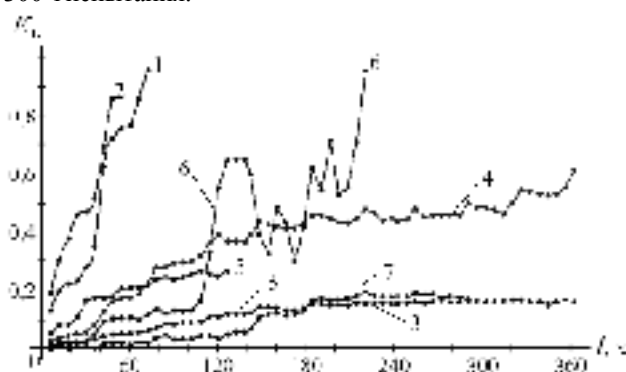


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения светового потока от времени испытания моторных масел при циклическом изменении температуры: 1 – минеральное – М-10-Г₂к; частично синтетические: 2 – Visco 3000 10W-40SL/CF; 3 – Zic 5000 5W-30 GL-4; синтетические: 4 – Mannol Elite 5W-40 SL/CF; 5 – Mobil Syntis 5W-40 SL/CF; 6 – Spectrol Polarm 0W-40 SJ/CF; 7 – Castrol SLX 0W-30 SL/CF

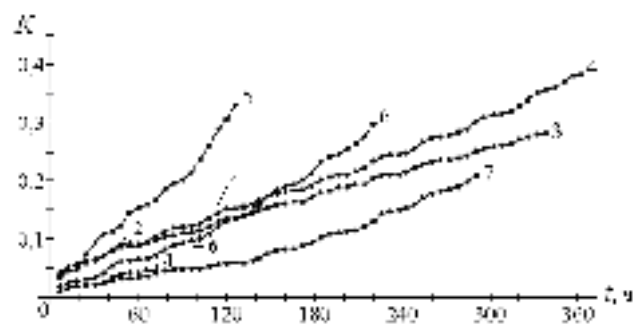


Рис. 3. Зависимость коэффициента летучести от времени и циклического изменения температуры испытания моторных масел

Связь между коэффициентами энергии превращения и поглощения светового потока (рис. 5) определяет количество тепловой энергии, затраченной на преобразование единицы продуктов окисления и испарившейся части масла при испытании, поэтому чем больше значение E_n при определенном значении коэффициента K_n , тем выше термоокислительная стабильность моторного мас-

ла. Зависимости $E_n = f(K_n)$ для масел (кривая 1) и (кривая 2) имеют линейный характер, синтетические масла (кривые 4, 5, 7) и частично синтетическое (кривая 3) имеют два линейных участка. На втором участке наблюдается разброс значений коэффициента E_n в связи с процессами релаксации и коагуляции продуктов окисления.

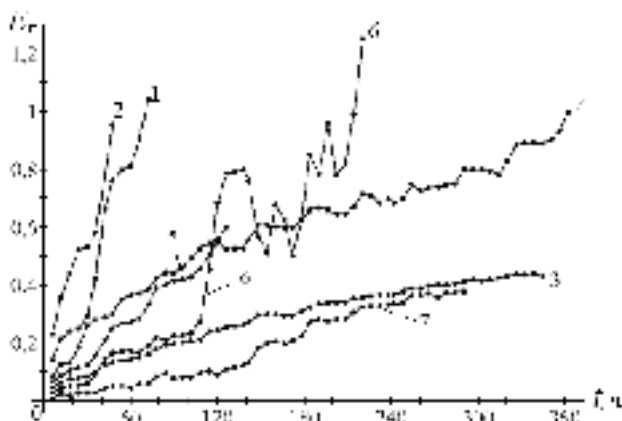


Рис. 4. Зависимость коэффициента энергии превращения от времени испытания моторных масел при циклическом изменении температуры от 150 до 180 °С (усл. обозн. на рис. 2)

Начальные участки зависимостей описываются уравнением вида

$$E_n = aK_n + c, \quad (2)$$

где a – коэффициент, характеризующий скорость процесса превращения; c – значение коэффициента E_n , при котором начинаются окислительные процессы.

Второй линейный участок зависимостей $E_n = f(K_n)$ (кривые 3, 5, 7) указывает на образование продуктов окисления, требующих большего количества тепловой энергии, а ее недостаток вызван расходом на испарение, поэтому на данном участке наблюдается увеличение коэффициента E_n и замедление роста коэффициента K_n .

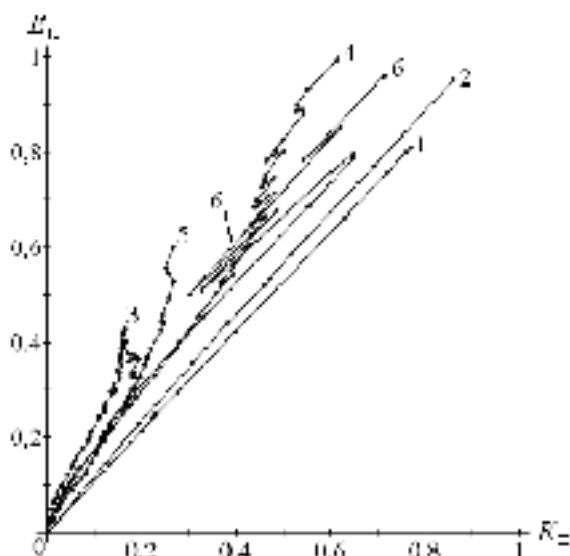


Рис. 5. Зависимость коэффициента энергии превращения от коэффициента поглощения светового потока при циклическом изменении температуры испытания моторных масел (условные обозначения на рис. 2)

При испытании синтетических масел Mannol Etite 5W-40 SL/CF (кривая 4) и Spectrol Polarm 0W-40 SL/CF (кривая 6) установлены большие колебания коэффициентов E_n и K_n , вызванные изменением температуры испытания, однако начальные линейные участки присутствуют. Это может объясняться процессами релаксации при снижении температуры испытания.

Скорость изменения коэффициента E_n на первом участке зависимости $E_n = f(K_n)$ предлагается в качестве критерия термоокислительной стабильности исследуемого масла и рекомендуется для применения при установлении или идентификации моторных масел по группам эксплуатационных свойств.

Для этого необходимо установить пределы изменения скорости процесса превращения избыточной тепловой энергии для каждой группы эксплуатационных свойств на основе статической обработки данных.

Одним из важных эксплуатационных показателей ресурса моторных масел является предельная температура работоспособности, при которой начинаются процессы превращения избыточной энергии в продукты окисления и испарения. В этой связи предложена модель, предусматривающая построение графической зависимости приращения коэффициента энергии превращения E_n от температуры испытания. Температура испытания, при которой $\Delta E_n = 0$ (рис. 6) является предельной и определяет температурную область работоспособности испытуемого масла, выше которой образуются продукты окисления и испарения.

Так, предельной температурой работоспособности является: для минерального масла М-10-Г₂к (кривая 1) – 150 °С; частично синтетических Visco 3000 SL/CF (кривая 2) – 140 °С, Zic 5000 5W-40 CL-4 (кривая 3) – 150 °С; синтетических Mannol Etite 5W-40 SL/CF (кривая 4) – 150 °С, Mobil Synt 5W-40 SL/CF (кривая 5) – 150 °С, Spectrol Polarm 0W-40 SL/CF (кривая 6) – 150 °С и Castrol GTX 0W-30 SL/CF (кривая 7) – 160 °С.

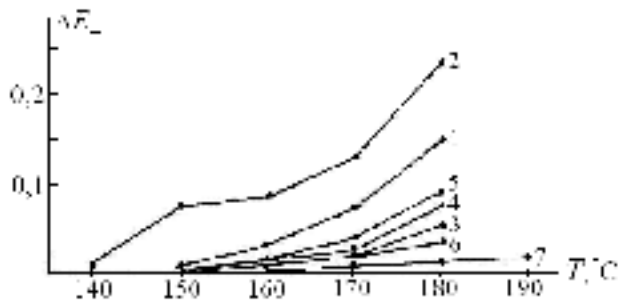


Рис. 6. Зависимость приращения коэффициента энергии превращения от температуры испытания моторных масел (условные обозначения на рис. 2)

Таким образом, для оценки качества моторных масел необходим комплексный метод. Его оценить одним каким-то показателем невозможно, поэтому в работе предлагается комплекс показателей, таких как коэффициент поглощения светового потока и энергия превращения, температура начала окисления и предельная температура работоспособности, которые повышают информацию об исследуемом смазочном масле.

1. Разработанная комплексная методика испытания моторных масел с циклическим изменением температу-

ры и применением простых средств измерения позволяет определить их термоокислительную стабильность, являющуюся интегральным показателем, отражающим влияние эксплуатационных факторов на состояние моторного масла.

2. Получены функциональные зависимости процесса окисления моторных масел при циклическом изменении температуры испытания различных базовых основ, выраженные коэффициентом поглощения светового потока, относительной вязкостью и летучестью от времени и температуры испытания, позволяющие количественно и качественно оценить их сопротивляемость окислению, склонность к загрязнению масляных систем двигателя, пусковые свойства, температурную область работоспособности и ресурс, а также идентифицировать на соответствие группам эксплуатационных свойств.

3. Предложен в качестве критерия термоокислительной стабильности коэффициент энергии превращения, определяемый суммой значений коэффициентов поглощения светового потока и летучести, характеризующий количество тепловой энергии, преобразованной в продукты окисления и конденсации, что позволяет сравнивать моторные масла по этому показателю, устанавли-

вать их ресурс и использовать для идентификации или установления групп эксплуатационных свойств новых сортов масел.

4. Установлена линейная зависимость между коэффициентами энергии превращения и поглощения светового потока при циклическом изменении температуры испытания, а концентрация и состав продуктов окисления определяет характер изменения зависимости $E_{\pi} = f(K_{\pi})$ и учитывает время и температуру испытания, что позволяет по аналитическим зависимостям определить скорость изменения процесса превращения, а по ее значению классифицировать моторные масла по группам эксплуатационных свойств.

5. Предложена модель определения температурной области работоспособности моторных масел, включающая построение зависимости приращения коэффициента энергии превращения от ступенчатого уменьшения температуры испытания, позволяющая установить температуру, при которой приращение равно нулю, что обеспечивает возможность сравнивать различные масла по этому показателю и определить предельную температуру, при которой окислительные процессы и испарение практически отсутствуют.

V. S. Danilenko, B. I. Kovalskiy, E. A. Vishnevskaya, Yu. N. Bezborodov, N. N. Ananjin

RESEARCH METHOD FOR THERMAL-OXIDATIVE STABILITY OF MOTOR OILS UNDER TESTING TEMPERATURE CYCLING

A research method for thermal-oxidative stability of motor oils under testing temperature cycling, evaluation criteria for the testing temperature effects on the oxidation processes and the oxidation product on the oil viscosity are represented.

Key words: thermal-oxidation, light flux adsorption factor, viscosity, volatility, transformation energy factor.

УДК 621.791.72

В. Я. Браверман, В. С. Белозерцев, О. В. Розанов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ ЛУЧА ОТНОСИТЕЛЬНО СТЫКА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ¹

Приведены описания и результаты некоторых экспериментов по изучению рентгеновского излучения, возникающего при электронно-лучевой сварке. Исследования проводятся с целью определения взаимосвязи излучения с процессом формирования сварного шва и использования излучения для управления сваркой.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, вторичные излучения, рентгеновское излучение, управление.

Возможность применения рентгеновского излучения (РИ) для получения информации о состоянии процесса электронно-лучевой сварки (ЭЛС) основывается на знании физических законов возникновения РИ и взаимодействия его с веществом. Аналитическое описание названных закономер-

ностей затруднено главным образом из-за отсутствия достоверных сведений о физических процессах, происходящих в канале проплавления. Это свидетельствует о целесообразности проведения экспериментальных исследований с целью разработки рентгеновских систем управления ЭЛС.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 07-08-00179).