

Б. И. Ковальский, А. Н. Сокольников, О. Н. Петров, В. Г. Шрам, Кравцова Е. Г.
Сибирский федеральный университет,
E-mail: shram18rus@mail.ru

Метод контроля температурной стойкости моторных масел и влияния продуктов температурной деструкции на противоизносные свойства

Представлены результаты определения температурной стойкости минеральных и полусинтетических моторных масел. Обоснован критерий температурной стойкости и определена связь между ним и противоизносными свойствами масел.

Ключевые слова: моторные масла, температурная стойкость, противоизносные свойства, коэффициент поглощения света, коэффициент испаряемости

Температурная стойкость, как показатель эксплуатационных свойств моторных масел, определяет их область работоспособности [1–2]. Данную характеристику определяют в основном при граничном трении скольжения [3–7]. Существует стандарт для экспериментальной оценки температурной стойкости [8], предусматривающий триботехнические испытания масел на четырехшариковой машине трения. Однако проведение триботехнических испытаний на транспортных предприятиях ограничено, т. к. они должны осуществляться специалистами в области триботехники и требует оснащения специальным оборудованием.

Целью настоящего исследования является обоснование возможности применения фотометрического метода контроля температурной стойкости моторных масел.

Методика исследования предусматривала использование следующих средств испытаний и измерений: прибор для термостатирования масел в диапазоне температур от 140 до 300°C без доступа воздуха при атмосферном давлении; фотометр, для измерения оптических свойств по коэффициенту поглощения светового потока и прямого фотометрирования термостатированных масел при толщине фотометрируемого слоя 8 мм; трехшариковая машины трения со схемой «шар-цилиндр» для определения параметра износа трех шаров (приборы запатентованы и изготовлены в лаборатории качества нефти и нефтепродуктов Института нефти и газа Сибирского федерального университета); электронные весы MW-1200 (CAS, Южная Корея) для измерения массы испарившегося масла при термостатировании в течение 7 ч; оптический микроскоп «Альтами 1 МЕТ» для измерения диаметров пятен износа на трех шарах (ООО «Альтами», Санкт-Петербург) [9].

В качестве объектов исследования были выбраны моторные масла, так как они работают в более жестких нагрузочных и температурных условиях, нежели трансмиссионные, гидравлические и др. При этом исследовались моторные масла, относящиеся к различным группам по эксплуатационным свойствам и классам вязкости: минеральные универсальные всесезонные моторные масла — Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC (1); Utech navigator 15W-40 CD/CF (2), полусинтетические — THK 10W-40 SL/CF (3), Mobil Super 2000 10W-40 SL/CF (4); THK 5W-40 SL/CF (5).

На **рис. 1** представлены зависимости коэффициента поглощения светового потока от температуры термостатирования моторных масел. Данные зависимости имеют два участка с различной интенсивностью изменения коэффициента поглощения светового потока. Первый участок для всех исследованных масел описывается линейным уравнением, причем начало участка для разных масел соответствует разным температурам: для масел 1, 2, 3 — температуре 140°C, которая определяет начало процесса температурной деструкции, для масел 4 и 5 — приблизительно 160°C. Можно утверждать, что температурный интервал первого участка зависимости $K_{\Pi} = f(T)$ определяет температурный интервал работоспособности исследуемых масел, а температура перехода на второй участок зависимости является предельной для данного масла. Так, предельная температура работоспособности для масел 1 и 2 составляет 220°C, для масла 3 — 200°C, 4 — 220°C и 5 — 180°C.

Второй участок, на котором происходит более интенсивный рост коэффициента K_{Π} , соответствует образованию продуктов температурной деструкции с большей оптической плотностью. Начало образования этих продуктов происходит при разных температурах термостатирования для каждого из исследованных масел и интенсивность этого процесса различна.

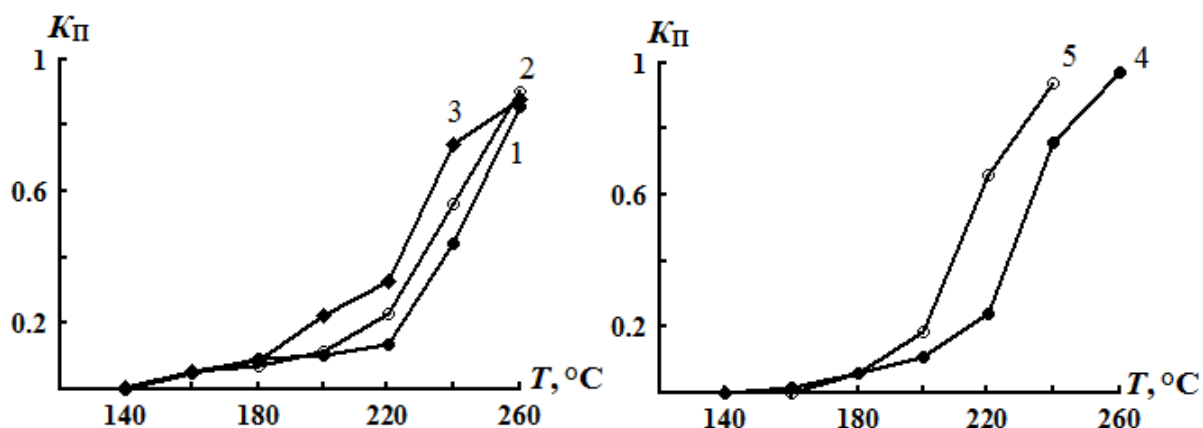


Рис. 1. Зависимости коэффициента поглощения светового потока от температуры термостатирования моторных масел: 1 — Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC, 2 — Utech navigator 15W-40 CD/CF, 3 — THK 10W-40 SL/CF, 4 — Mobil Super 2000 10W-40 SL/CF, 5 — THK 5W-40 SL/CF

При термостатировании масел изменяются не только их оптические свойства, но и испаряемость. Для оценки испаряемости масел при термостатировании предложен коэффициент испаряемости K_G , определяемый по формуле:

$$K_G = \frac{m}{M}, \quad (1)$$

где m — масса испарившегося масла при температуре испытания, г; M — масса пробы масла после термостатирования при температуре испытания, г.

Зависимости коэффициента испаряемости от температуры термостатирования представлены на **рис. 2**. Установлено, что с увеличением температуры термостатирования коэффициент K_G увеличивается по экспоненте. Для определения различий в испаряемости масел, определим значение коэффициента K_G при температуре 220°C. Для масла 1 коэффициент испаряемости составил 0,085, для масла 2 — 0,074, 3 — 0,247, 4 — 0,065 и 5 — 0,078.

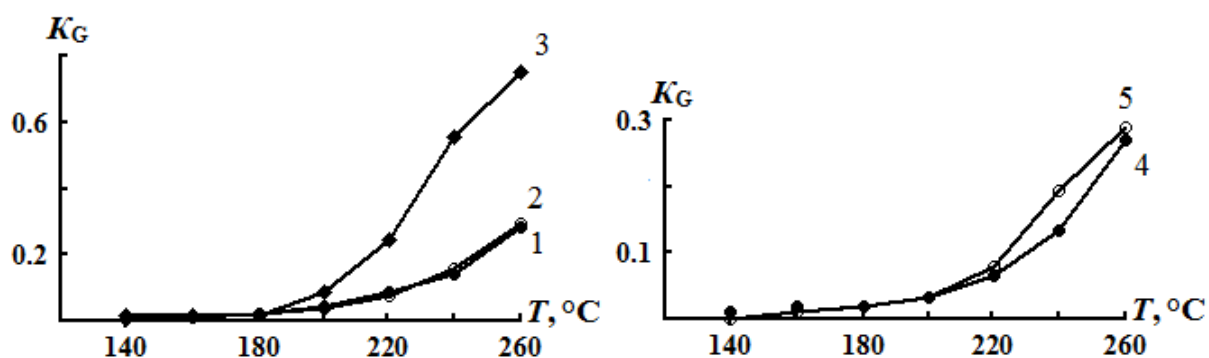


Рис. 2. Зависимости коэффициента испаряемости от температуры термостатирования моторных масел: 1 — Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC, 2 — Utech navigator 15W-40 CD/CF, 3 — ТНК 10W-40 SL/CF, 4 — Mobil Super 2000 10W-40 SL/CF, 5 — ТНК 5W-40 SL/CF

Наименьшей испаряемостью характеризуется полусинтетическое масло Mobil Super 2000 10W-40 SL/CF, а наибольшей — полусинтетическое масло ТНК 10W-40 SL/CF.

Таким образом, установлено, что при термостатировании моторных масел изменяются их оптические свойства и испаряемость, т. е. эти два параметра должны определять их температурную стойкость или сопротивляемость процессам температурной деструкции. Учитывая, что изменения оптических свойств и испаряемость масел протекают параллельно при термостатировании, то сопротивление масел температурной деструкции можно определить, применяя законы электротехники о параллельном соединении сопротивлений электрической цепи, R :

$$R = \frac{K_{\Pi} \cdot K_G}{K_{\Pi} + K_G}. \quad (2)$$

Если принять, что каждый смазочный материал характеризуется своим сопротивлением температурной деструкции, которое можно принять за единицу, то изменение сопротивляемости температурным воздействиям R_g можно определить из выражения [10]:

$$R_g = 1 - \frac{K_{\Pi} \cdot K_G}{K_{\Pi} + K_G}, \quad (3)$$

Зависимости сопротивления моторных масел температурной деструкции от температуры термостатирования представлены на **рис. 3**.

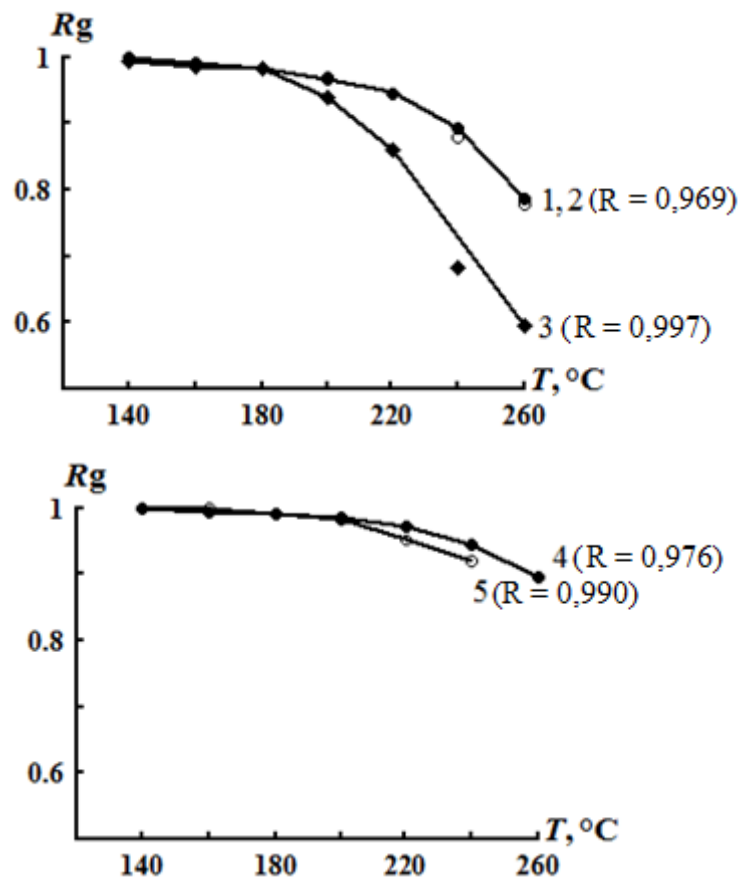


Рис. 3. Зависимости коэффициента сопротивления температурной деструкции от температуры испытания моторных масел: 1 — Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC, 2 — Utech navigator 15W-40 CD/CF, 3 — THK 10W-40 SL/CF, 4 — Mobil Super 2000 10W-40 SL/CF, 5 — THK 5W-40 SL/CF

Данные зависимости описываются полиномом второго порядка, а регрессионные уравнения для масел имеют вид:

$$1 \quad \text{Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC} \quad R_g = -3,96 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,0126 \cdot T + 0,0001 \quad (4)$$

$$2 \quad \text{Utech navigator 15W-40 CD/CF} \quad R_g = -3,96 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,0126 \cdot T + 0,0001 \quad (5)$$

$$3 \quad \text{ТНК 10W-40 SL/CF} \quad R_g = -2,21 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,0073 \cdot T + 0,4043 \quad (6)$$

$$4 \quad \text{Mobil Super 2000 10W-40 SL/CF} \quad R_g = -2,22 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,0074 \cdot T + 0,3980 \quad (7)$$

$$5 \quad \text{ТНК 5W-40 SL/CF} \quad R_g = -2,40 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,0075 \cdot T + 0,4111 \quad (7)$$

Для определения более термостойких масел необходимо найти температуру, при которой коэффициент сопротивления R_g достигнет, например, значения 0,9. Такой температурой для масла 1 является 235°C, для масла 2 — 235°C, 3 — 208°C, 4 — 260°C и 5 — 245°C. Согласно полученным данным, наиболее термостойкими являются минеральные масла 1 и 2 и частично синтетическое масло 4.

Для оценки влияния продуктов температурной деструкции на противоизносные свойства моторных масел они испытывались на машине трения со следующими параметрами: нагрузка — 13 Н; скорость скольжения — 0,68 м/с; температура масла в объеме — 80°C; время испытания — 2 ч. Противоизносные свойства оценивались по среднеарифметическому значению диаметров пятен износа на трех шарах. В качестве критерия противоизносных свойств предложен коэффициент Π , определяемый по соотношению:

$$\Pi = \frac{K_{\Pi}}{U}, \quad (8)$$

где U — среднеарифметическое значение диаметров пятен износа на трех шарах, мм.

Данный критерий характеризует условную концентрацию продуктов температурной деструкции на номинальной площади фрикционного контакта. Зависимости критерия противоизносных свойств от температуры термостатирования моторных масел представлены на **рис. 4**.

Данные зависимости имеют два участка, характеризующиеся различной скоростью изменения критерия Π , первый из которых определяет температурную область работоспособности рабочих масел, совпадающую с областью, определяемой по коэффициенту K_{Π} (рис. 1). Однако для оценки влияния продуктов температурной деструкции на противоизносные свойства термостатированных масел целесообразно исследовать зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока рис. 5.

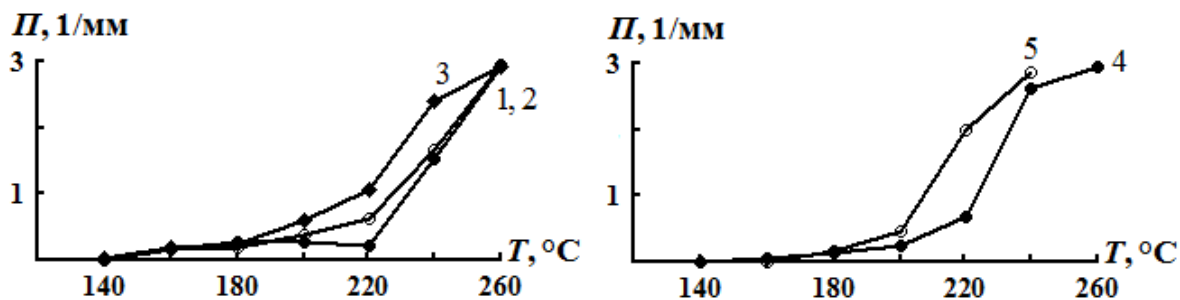


Рис. 4. Зависимости критерия противоизносных свойств от температуры термостатирования моторных масел: 1 — Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC, 2 — Utech

navigator 15W-40 CD/CF, 3 — THK 10W-40 SL/CF, 4 — Mobil Super 2000 10W-40 SL/CF, 5 — THK 5W-40 SL/CF

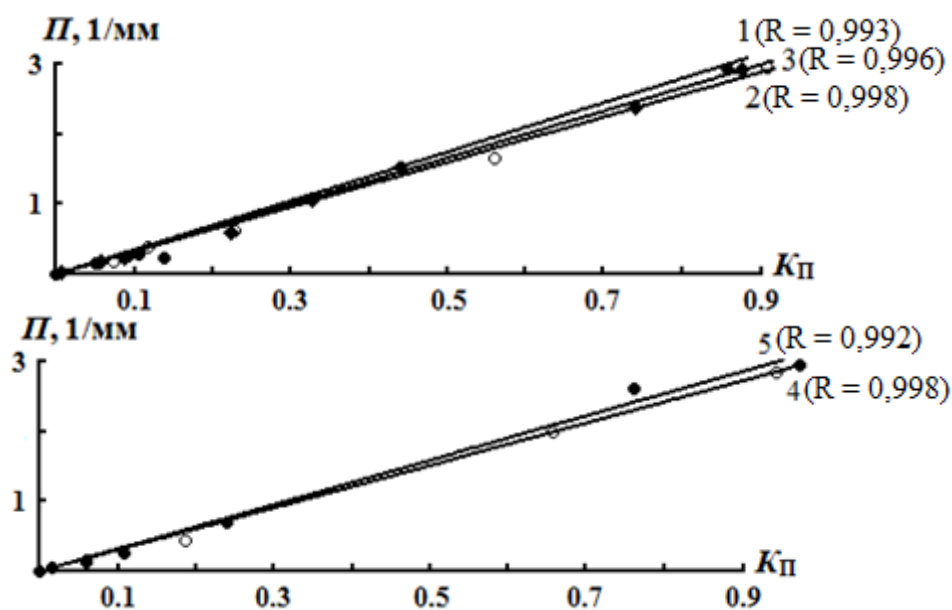


Рис. 5. Зависимости критерия противоизносных свойств термостатированных моторных масел от коэффициента поглощения светового потока: 1 — Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC, 2 — Utech navigator 15W-40 CD/CF, 3 — THK 10W-40 SL/CF, 4 — Mobil Super 2000 10W-40 SL/CF, 5 — THK 5W-40 SL/CF

Установлено, что зависимость $\Pi = f(K_{\Pi})$ имеет линейный характер и описывается уравнениями вида

$$\Pi = a \cdot K_{\Pi}, \quad (9)$$

где a — коэффициент, характеризующий скорость изменения критерия Π .

Регрессионные уравнения зависимостей $\Pi = f(K_{\Pi})$ для исследованных масел имеют вид:

$$1 \quad \text{Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC} \quad \Pi = 3,50 \cdot K_{\Pi} \quad (10)$$

$$2 \quad \text{Utech navigator 15W-40 CD/CF} \quad \Pi = 3,21 \cdot K_{\Pi} \quad (11)$$

$$3 \quad \text{THK 10W-40 SL/CF} \quad \Pi = 3,33 \cdot K_{\Pi} \quad (12)$$

$$4 \quad \text{Mobil Super 2000 10W-40 SL/CF} \quad \Pi = 3,18 \cdot K_{\Pi} \quad (13)$$

$$5 \quad \text{THK 5W-40 SL/CF} \quad \Pi = 3,03 \cdot K_{\Pi} \quad (14)$$

Наивысшими противоизносными свойствами характеризуется минеральное масло Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC.

Связь между противоизносными свойствами и коэффициентом сопротивления температурной деструкции представлена зависимостями $\Pi = f(R_g)$ (рис. 6), из которых видно,

что с уменьшением сопротивления температурной деструкции, противоизносные свойства улучшаются.

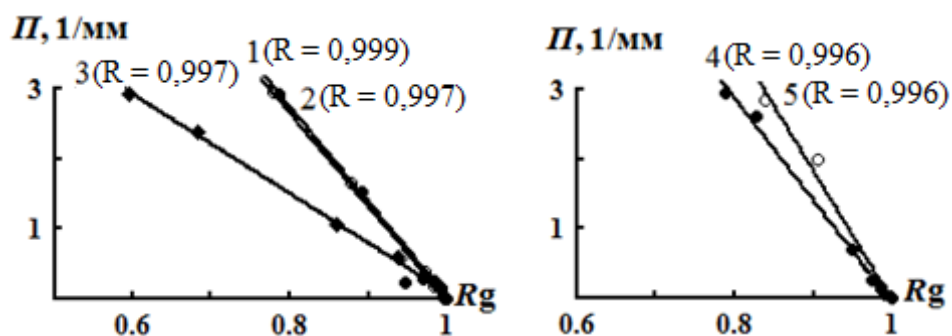


Рис. 6. Зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента сопротивления температурной деструкции при термостатировании моторных масел: 1 — Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC, 2 — Utech navigator 15W-40 CD/CF, 3 — ТНК 10W-40 SL/CF, 4 — Mobil Super 2000 10W-40 SL/CF, 5 — ТНК 5W-40 SL/CF

Установлено, что зависимость $\Pi = f(R_g)$ имеет линейный характер, а регрессионные уравнения для масел имеют вид:

$$1 \quad \text{Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC} \quad \Pi = -13,55 \cdot R_g + 13,59 \quad (15)$$

$$2 \quad \text{Utech navigator 15W-40 CD/CF} \quad \Pi = -13,35 \cdot R_g + 13,34 \quad (16)$$

$$3 \quad \text{ТНК 10W-40 SL/CF} \quad \Pi = -7,08 \cdot R_g + 7,17 \quad (17)$$

$$4 \quad \text{Mobil Super 2000 10W-40 SL/CF} \quad \Pi = -14,73 \cdot R_g + 14,67 \quad (18)$$

$$5 \quad \text{ТНК 5W-40 SL/CF} \quad \Pi = -18,69 \cdot R_g + 18,66 \quad (19)$$

Кроме того, при одинаковом значении критерия противоизносных свойств сопротивляемость масел температурным воздействиям различна. Так, при $\Pi = 1,0 \text{ мм}^{-1}$ сопротивляемость минеральных моторных масел (кривые 1 и 2) составляет 0,9, а полусинтетических масел ТНК 10W-40 SL/CF, Mobil Super 2000 10W-40 SL/CF и ТНК 5W-40 SL/CF — 0,86, 0,93, и 0,95 соответственно. Так как коэффициент R_g зависит от концентрации продуктов температурной деструкции в масле, то одинаковые противоизносные свойства масел после термостатирования наступают при их различной концентрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матвеевский Р. М.* Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. — М.: Наука. — 1971. — 227 с.

2. **Костецкий Б. И.** Трение, смазка и износ в машинах. — Киев: Техника, 1970. — 396 с.
3. **Буяновский И. А.** — Трение и износ. — 1993. — Т. 14 (1). — С. 129–142.
4. **Буяновский И. А.** — Механизация строительства. — 2015. — № 6. — С. 16–19.
5. **Мышкин Н. К., Кончиц В.В.** — К определению температурной стойкости граничных слоев. — Трение и износ. — 1981. — №4. — С. 725–728.
6. **Мельников Э. Л., Серезжин М. А., Бодарева А. В. и др.** — Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2012. — № 4. — С. 37–41.
7. **Лаихи В. Л., Буяновский И. А., Чудиновских А. Л. и др.** — Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2015. — № 6. — С. 8–13.
8. ГОСТ 23.221-84. Метод экспериментальной оценки температурной стойкости смазочных материалов при трении.
9. **Ковальский Б. И., Шрам В. Г., Крацова Е. Г. и др.** — Промышленный сервис. — 2013. — № 2. — С. 17–20.
10. Пат. 2406087 (РФ).