ТРИБОТЕХНИКА

УДК 621.43-4

В. Г. Шрам, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Малышева, И. В. Надейкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДУКТОВ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ И НАГРУЗКИ НА ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЧНО СИНТЕТИЧЕСКОГО МОТОРНОГО МАСЛА ТНК СУПЕР 5W-40 SL/CF. ЧАСТЬ 2

Введение. Одним из основных требований к моторным маслам является высокие температурная стойкость и термоокислительная стабильность, а также противоизносные свойства, что позволяет увеличить их эксплуатационный ресурс [1].

Противоизносные свойства моторных масел зависят от химического состава и полярности базового масла, состава композиций присадок и вязкостно-температурной характеристики масла с присадками, которая определяет температурные пределы его применения [1]. Особенно важны эффективная вязкость масла при температуре 130-180 °С и градиенте скорости сдвига 10^5-10^7 $с^{-1}$. Противоизносные свойства масел зависят от их способности формировать хемосорбционные и химически модифицированные граничные слои на поверхностях трущихся деталей.

Важнейшей характеристикой способности масла предотвращать коррозионный износ поршневых колец и цилиндров является его нейтрализующая способность, показателем которой служит щелочное число. Придание маслу достаточной нейтрализующей способности путем введения в его состав дитиофосфатов цинка оказывается достаточным для предотвращения коррозионно-механического изнашивания и модифицирования поверхностей трения тяжелонагруженных сопряжений во избежание задиров или усталостного выкрашивания. Для улучшения противоизносных свойств при граничной смазке в масла вводят присадки содержащие серу, фосфор, галогены, бор, а также беззольные дисперсанты.

Трибологические характеристики масел определяются на четырехшариковой машине трения по ГОСТ 9490-75, нормированы стандартами и техническими условиями на многие моторные масла для контроля их производства. Однако связь между оценкой противоизносных и противозадирных свойств на машине трения и фактическими противоизносными свойствами масел в условиях их применения установить не всегда возможно. При моторных испытаниях противоизносные свойства оценивают по потере массы поршневых колец, задиру и питингу кулачков и толкателей, линейному износу этих деталей и состоянию поверхностей. Однако моделировать моторные испытания по оценке противоизносных свойств можно по двум направлениям с использованием машин трения. Первое направление включает испытания масел работающих в двигателях. Для этого через равные промежутки времени отбираются пробы масел для определения их противоизносных свойств, что позволяет исследовать динамику их

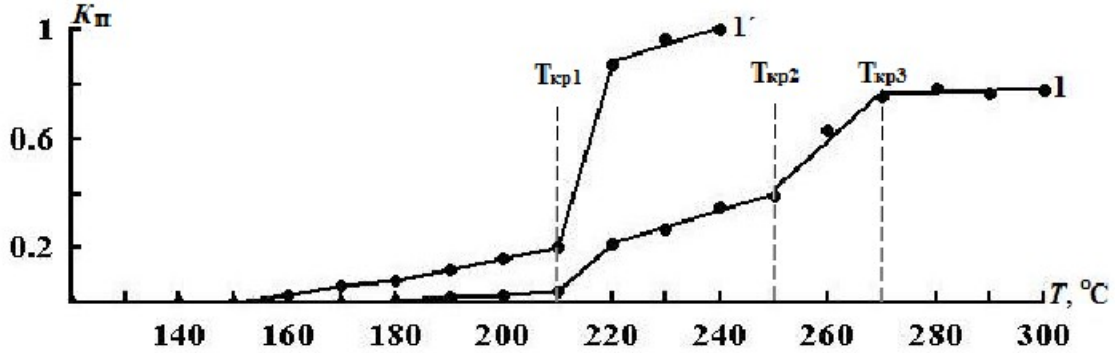

Рис. 1. Зависимости коэффициента поглощения светового потока от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла ТНК 5W-40 SL/CF: (фотометрирование при толщине фотометрируемого слоя: 1 – 8 мм; 1′ – 2 мм)

изменения.

Второе направление включает искусственное окисление и термостатирование товарных масел при различных температурах и определение влияния продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства, что в целом позволяет контролировать эти свойства при производстве масел.

Методика исследования описана в работах [2-5] и предусматривает применение таких измерительных средств как прибор для определения температурной стойкости, малообъемный вискозиметр, фотометрическое устройство для прямого фотометрирования масел, трехшариковая машина трения со схемой "шар-цилиндр".

Результаты исследований и их обсуждение. Частично синтетическое моторное масло ТНК Супер 5W-40 SL/CF относится к всесезонным универсальным применяется в бензиновых и дизельных двигателях, класс вязкости по SAE J300 5W-40, а группа эксплуатационных свойств по API для бензиновых двигателей SL, а дизельных CF. Данное масло термостатировалось в диапазоне температур от 140 до 300 °С с повышением тем-

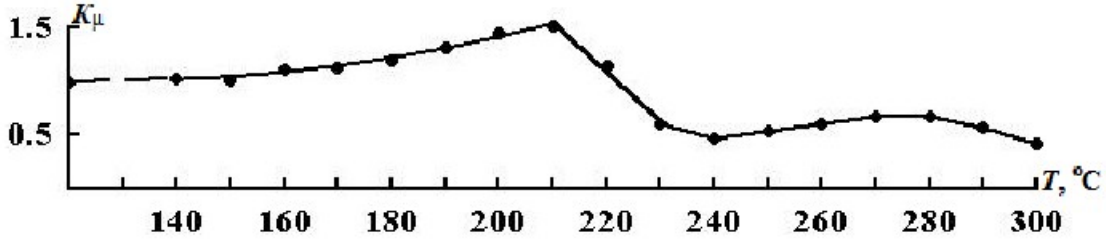

Рис. 2. Зависимость коэффициента относительной вязкости от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла ТНК 5W-40 SL/CF

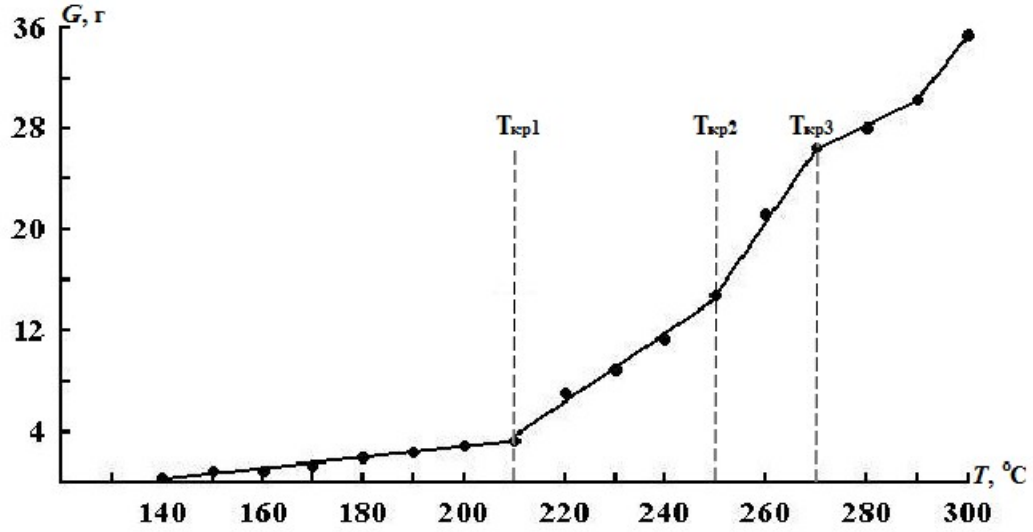

Рис. 3. Зависимость летучести от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла ТНК 5W-40 SL/CF

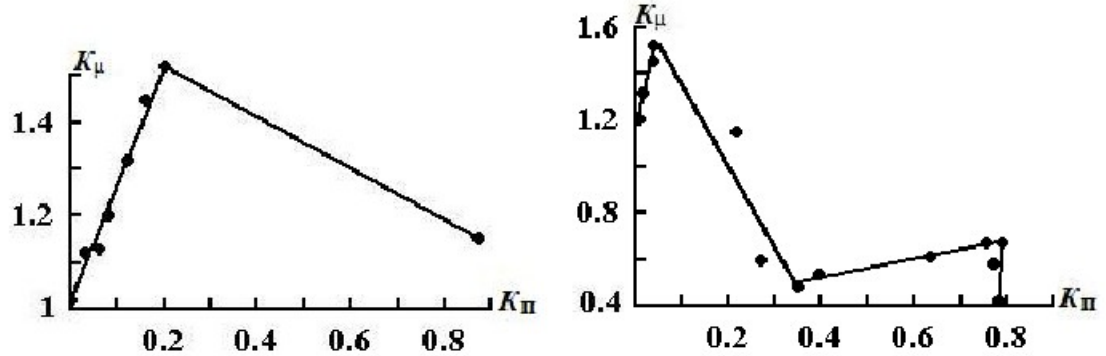

Рис. 4. Зависимость коэффициента послощения светового потока от летучести при термостатирования частично синтетического моторного масла ТНК 5W-40 SL/CF (толщина фотометрируемого слоя 8 мм)

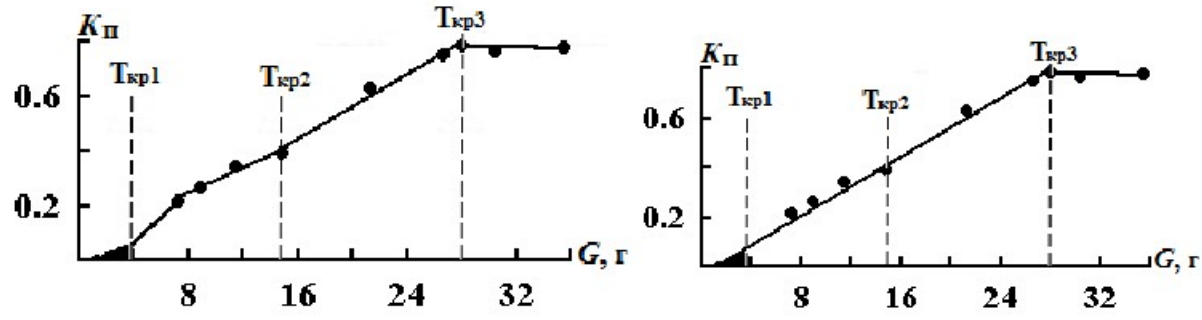

Рис. 5. Зависимости коэффициента поглощения светового потока от летучести при термостатирования частично синтетического моторного масла ТНК 5W-40 SL/CF при толщине фотометрируемого слоя 2 мм

пературы на 10 °С. Время испытания составило 8 часов, после чего определялась вязкость, испаряемость (летучесть), оптические свойства, по коэффициенту поглощения светового потока, противоизносные свойства на трехшариковой машине трения.

Фотометрирование термостатированных масел проводилось при толщинах фотометрируемого слоя 8 и 2 мм, т.к. при низких температурах до 190 °С наступает низкая чувствительность фотометра при толщине 2 мм (рис. 1).

Согласно полученным данным зависимость коэффициента поглощения светового потока при толщине фотометрируемого слоя 8 мм имеет линейную зависимость от температуры термостатирования в температурном диапазоне от 150 до 210 °С. При температуре 220 °С наблюдается резкое увеличение коэффициента поглощения светового потока $K_П$, из-за образования более оптически плотных продуктов деструкции. Фотометрирование термостатированных масел в температурной области от 220 до 300 °С при тощине фотометрируемого слоя 2 мм показало, что оптические свойства масла изменяются с различной интенсивностью в температурных областях от 220 до 250 °С, и от 250 до 270 °С, а в области от 270 до 300 °С наступает стабилизация значения коэффициента $K_П$. Поэтому при термостатировании частично синтетического масла в температурном диапазоне от 140 до 300 °С установлено три критические температуры 210, 250 и 270 °С, при которых происходит сброс избыточной тепловой энергии, в результате чего образуются продукты с большей оптической плотностью. Третья критическая температура определяет синтетическую основу.

Вязкость термостатированных масел оценивалась коэффициентом относительной вязкости K_μ, определяемым отношением вязкости термостатированного масла к вязкости товарного. Установлено, что в диапазоне температур от 140 до 210 °С вязкость увеличивается на 50% (рис. 2). Однако при температуре 240 °С она уменьшается на 50% и в дальнейшем стабилизируется в диапазоне температур от 240 до 280 °С. Что вызвано наличием двух базовых основ, причем очевидно, что де-

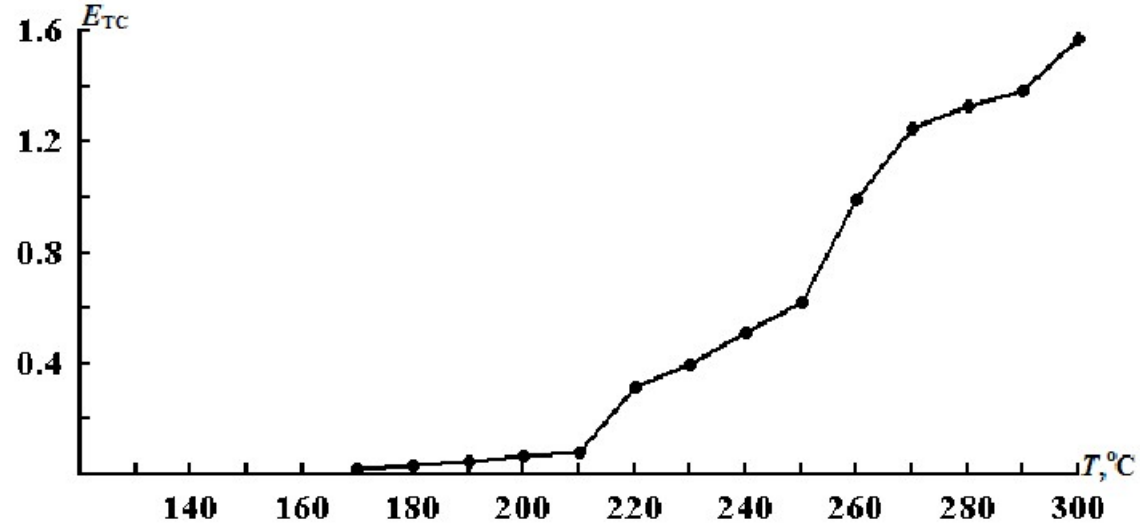

Рис. 6. Зависимости критерия температурной стойкости от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла ТНК 5W-40 SL/CF при толщине фотометрируемого слоя 2 мм

струкция минеральной основы происходит в температурном диапазоне от 210 до 240 °С, а деструкция синтетической основы наступает при температуре 280 °С.

Рассматривая зависимость $G=f(T)$ (рис. 3) можно выделить 4критические температуры 210, 250, 270 и 290 °С, при которых изменяется летучесть частично синтетического масла, причем критические температуры $T_{кр3}$ и $T_{кр4}$ определяют синтетическую основу.

Влияние продуктов деструкции на вязкость исследовалось зависимостью $K_\mu = f(K_П)$ (рис.

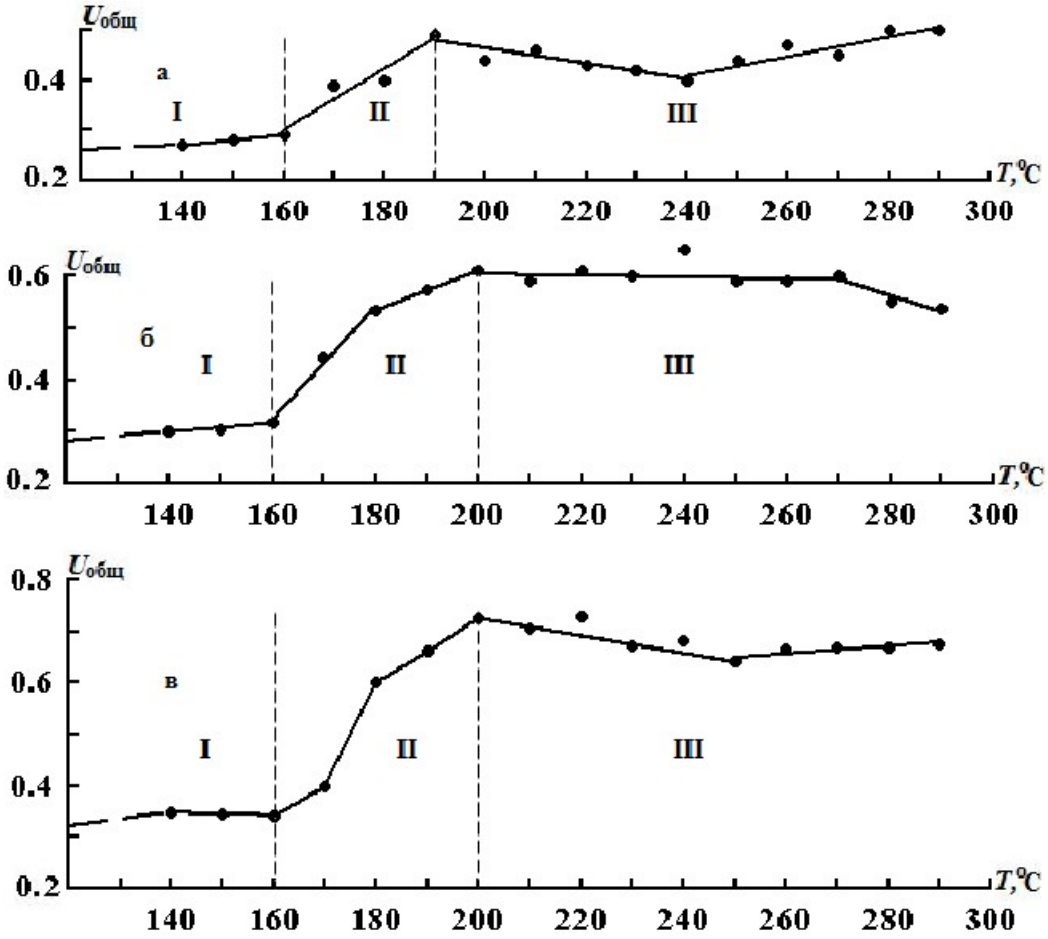

Рис. 7. Зависимости износа от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла ТНК 5W-40 SL/CF и нагрузки: а – 13Н; б – 23Н; в –33Н

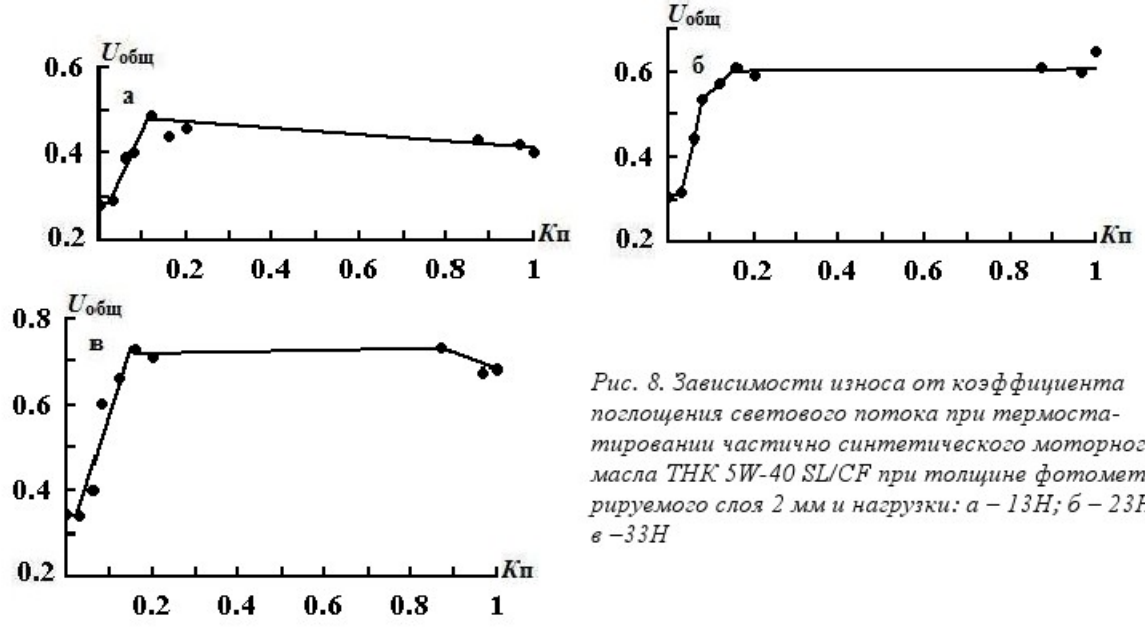

Рис. 8. Зависимости износа от коэффициента поглощения светового потока при термостатировании частично синтетического моторного масла ТНК 5W-40 SL/CF при толщине фотометрируемого слоя 2 мм и нагрузки: а – 13Н; б – 23Н; в –33Н

4). Установлено, что до значения коэффициента $K_П$ =0.2 ед. (температура испытания 210 °С) наблюдается линейная зависимость т.е основное влияние на вязкость до температуры $T_{кр1}$ оказывают продукты деструкции. Однако при увеличении коэффициента $K_П$ >0,2 ед. вязкость понижается в результате деструкции вязкостной присадки.

Влияние летучести масла на значения $K_П$ исследовано зависимостью $K_П = f(G)$ (рис. 5). Показано, что при значениях летучести до 3,4 г (температурный диапазон от 140 до 210 °С), что соответствует диапазону температур $T_{кр1}$ оптические свойства масла изменяются незначительно. Дальнейшее увеличение температуры от $T_{кр1}$ до $T_{кр3}$ вызывает увеличение как коэффициента $K_П$, так и летучести, однако при температуре больше $T_{кр3}$ установлено увеличение только летучести при постоянном значении коэффициента $K_П$. В этот период сброс избыточной тепловой энергии поглощается продуктами испарения.

Таким образом, при термостатировании частично синтетического моторного масла сброс избыточной тепловой энергии происходит по двум каналам, изменяющих оптические свойства и летучесть масла, поэтому температурную стойкость предложено оценивать коэффициентом $E_{ТС}$, оп-

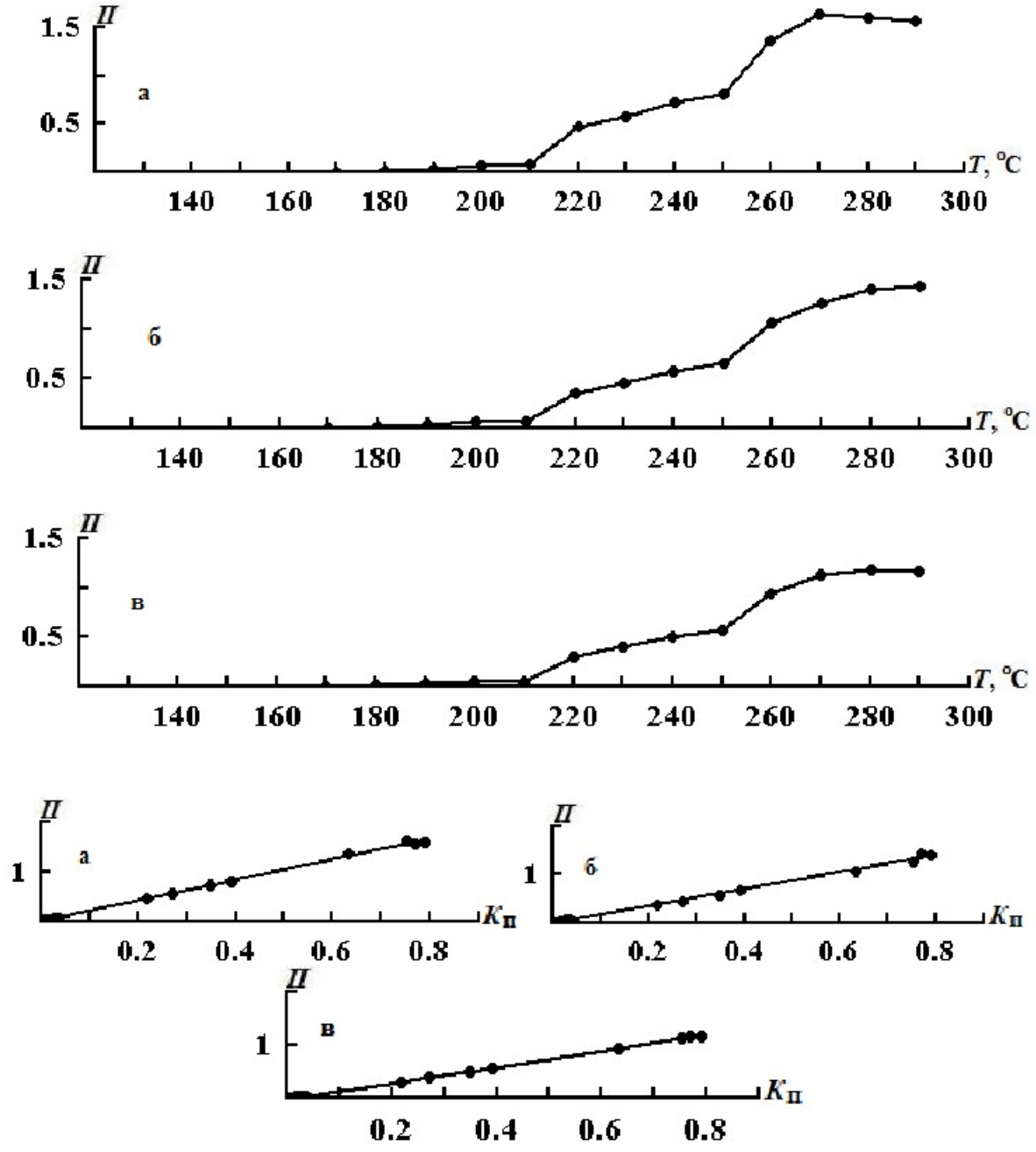

Рис. 9. Зависимости критерия противоизносных свойств от температуры испытания (I) и коэффициента поглощения светового потока (II) при термостатировании частично синтетического моторного масла ТНК 5W-40 SL/CF при толщине фотометрируемого слоя 2 мм и нагрузки: а – 13Н; б – 23Н; в –33Н

ределяемым суммой

$$E_{ТС} = K_П + K_G, \quad (2)$$

где $K_П$ – коэффициент поглощения светового потока; K_G – коэффициент летучести масла.

$$K_G = m/M, \quad (3)$$

где m – масса испарившегося масла при термостатировании, г; M – масса пробы масла после термостатирования, г.

Коэффициент температурной стойкости моторного масла является безразмерным, и позволяет сравнивать различные масла, а зависимость его от температуры термостатирования представлена на рис. 6. Показано, что независимо от толщины фотометрируемого слоя зависимость $E_{ТС} = f(T)$ претерпевает изгиб при температурах 210, 250, 270 и 290 °С.

Влияние продуктов температурной деструкции на изменение противоизносных свойств исследовалось на трехшариковой машине трения. Параметры трения составили: нагрузки 13, 23 и 33Н, скорость скольжения 0,68 м/с, температура испытания 80 °С, время испытания 2 ч.

Противоизносные свойства термостатированных масел оценивались по среднему арифметическому значению диаметра пятна износа на трех шарах. Зависимости диаметра пятна износа от температуры и нагрузки представлены на рис. 7. Установлено, что независимо от нагрузки зависимости $U = f(T)$ имеют 3 участка, различающихся величиной износа. Причем характер изменения этих участков идентичен для всех нагрузок. На участке I износ незначительно изменяется, поскольку при этих температурах (140-160 °С) деструкции масла не происходит, и составляет при нагрузках: 13Н ≈ 0,275 мм; 23Н ≈ 0,310 мм; 33Н ≈ 0,345 мм. На II участке износ увеличивается, но скорость износа и диапазон температур для каждой нагрузки различен, что подтверждает влияние продуктов деструкции. Так, износ увеличился для нагрузок: 13Н (рис. 7а) (диапазон температур от 160 до 190 °С), на 0,207 мм; 23Н (рис. 7б) (диапазон температур от 160 до 200 °С) на 0,254 мм; 33Н (рис. 7в) (диапазон температур от 160 до 200 °С) на 0,357 мм. По отношению к износу на I–м участке, на участке III износ стабилизируется, но на разных уровнях в зависимости от нагрузки: 13Н ≈ 0,480 мм; 23Н ≈ 0,595 мм; 33Н ≈ 0,685 мм. Таким образом установлено, что нагрузка значительно влияет на параметр износа.

Зависимости диаметра пятна износа от коэффициента поглощения светового потока, характеризующего концентрацию продуктов деструкции, и нагрузки представлены на рис. 8. Показано, что независимо от нагрузки при малых концентрациях продуктов температурной деструкции противоизносные свойства термостатированных масел понижаются. Однако максимальное увеличение износа при нагрузки 13Н наступает при коэффициенте $K_П = 0{,}12$ ед. (температура 190 °С), а при нагрузках 23 и 33Н максимальный износ наступает при коэффициенте $K_П = 0{,}16$ ед. (температура 200 °С). Дальнейшее увеличение концентрации продуктов температурной деструкции ($K_П$) не оказывает влияние на противоизносные свойства независимо от нагрузки, в результате образования хемосорбционных слоев на поверхностях трения.

В качестве критерия противоизносных свойств термостатированных масел предложен критерий $П$, определяемый выражением

$$П = \frac{K_П}{U}, \quad (8)$$

где $K_П$ - коэффициент поглощения светового потока; U - параметр износа, мм.

Данный критерий характеризует условную концентрацию продуктов деструкции на номинальной площади фрикционного контакта (рис. 9). Показано, что зависимости критерия противоизносных свойств от температуры термостатирования независимо от нагрузки претерпевают изгиб при температуре 210 °С, т.е. при критической температуре $T_{кр1}$, а его зависимости от коэффициента поглощения светового потока имеют линейный характер.

Причем чем, выше величина нагрузки тем ниже противоизносные свойства, при одном и том же значении $K_П$.

Регрессионные уравнения зависимостей противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока при нагрузках имеют вид

P=13Н $П = 2{,}11K_П$, (9)

P=23Н $П = \mathbf{1{,}67}K_П$, (10)

P=33Н $П = 1{,}48K_П$, (11)

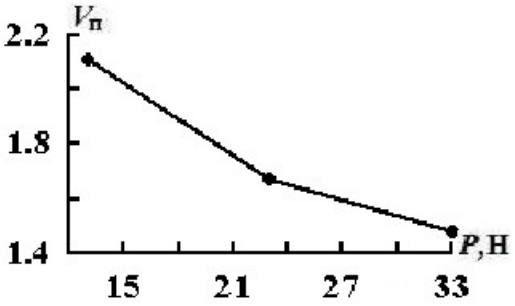

Рис.10 Зависимость скорости изменения критерия противоизносных свойств от нагрузки

Коэффициенты 2,11; 1,67; 1,48 характеризуют скорость изменения критерия противоизносных свойств $V_П$, зависимость которой представлена на рис. 10. Установлено, что скорость изменения критерия противоизносных свойств уменьшается с увеличением нагрузки за счет увеличения площади контакта т.е. понижения противоизносных свойств.

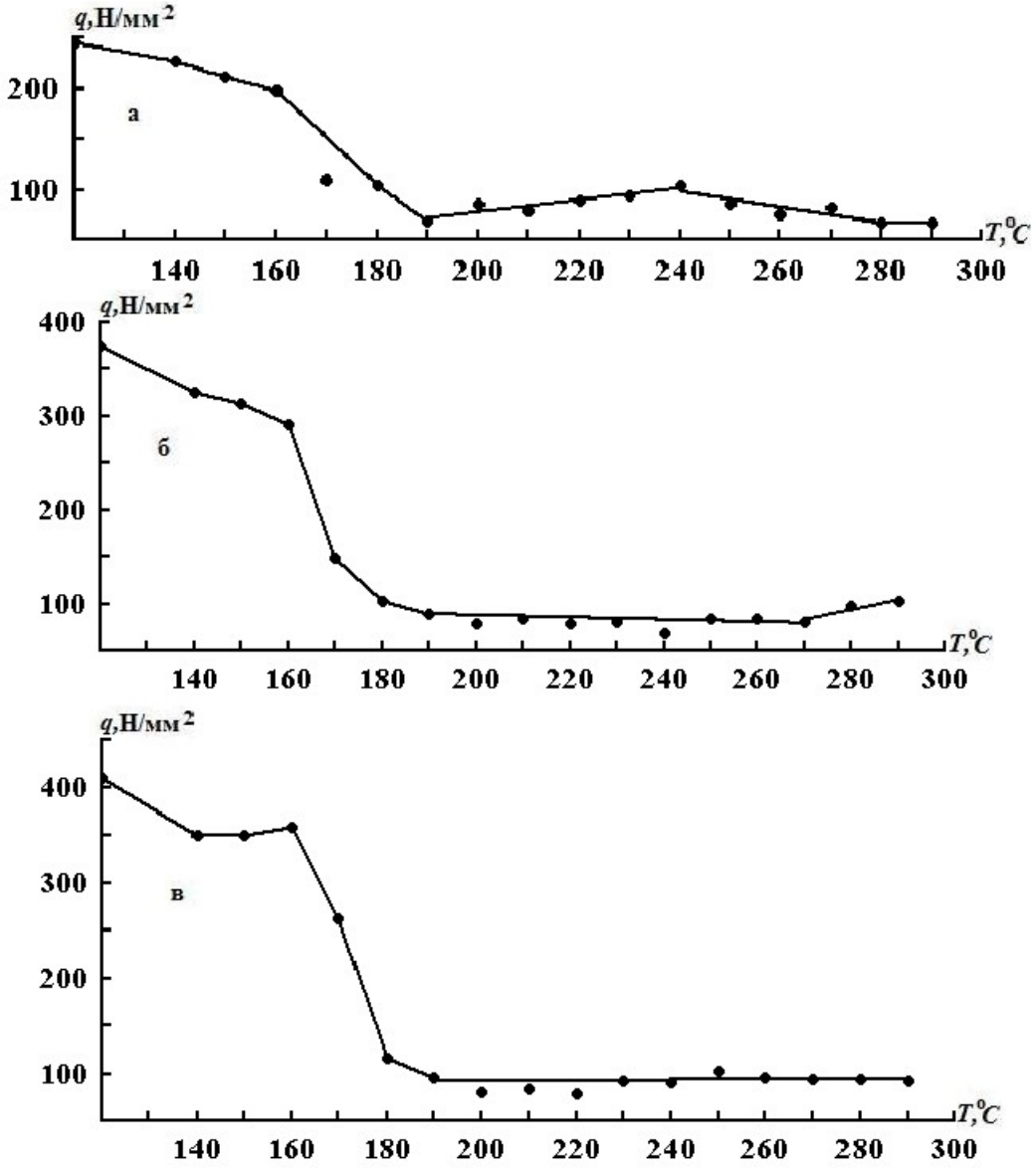

Рис. 11. Зависимости давления на фрикционном контакте от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла ТНК 5W-40 SL/CF и нагрузки: а – 13Н; б – 23Н; в – 33Н

Влияние процессов температурной деструкции и нагрузки на изменение противоизносных свойств исследовалось давлением в контакте (рис. 11).

Установлено, что давление в контакте имеет максимум в начальный период термостатирования масла ТНК 5W-40 независимо от нагрузки, а при температуре 190 °С оно принимает минимальное значение. Дальнейшее повышение температуры термостатирования приводит к стабилизации давления независимо от нагрузки, но на разных уровнях, так при при нагрузках: 13Н – $q \approx 75$ Н/мм^2, 23Н – $q \approx 85$ Н/мм^2, 33Н – $q \approx 90$ Н/мм^2. Показано, что с увеличением нагрузки давление в контакте возрастает.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. При термостатировании частично синтетического моторного масла ТНК Супер 5W-40 SL/CF в диапазоне температур от 140 до 300 °С установлены четыре критические температуры (210, 250, 270 и 290 °С), при которых наблюдается резкое увеличение коэффициента поглощения светового потока и летучести, что обусловлено сбросом избыточной тепловой энергии.

2.Параметр износа термостатированных масел независимо от нагрузки характеризуется тремя температурными областями, различающихся величиной износа. Предложен критерий оценки противоизносных свойств термостатированных масел, зависимость которого от коэффициента поглощения светового потока имеет линейный характер, и характеризует условную концентрацию продуктов температурной деструкции на номинальной пло-

щади фрикционного контакта, причем противоизносные свойства понижаются с увеличением нагрузки испытания, а давление в контакте возрастает.

3. Противоизносные свойства термостатированных масел понижаются в температурной области до $T_{кр1}$, а затем стабилизируются, что объясняется образованием на поверхностях трения хемосорбционных граничных слоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник / И. Г. Анисимов, К. М. Бадыштова, С. А. Бнатов и др. : под. Ред. В. М. Школьникова. Изд. 2-е перераб. И доп. – М. : Издательский центр "Техиформ", 1999. – 596 с.

2. *Ковальский Б. И.* Температурная стойкость моторных и трансмиссионных масел / Б. И. Ковальский, Н. Н. Малышева. – Вестник КрасГАУ : Вып. 12. – Красноярск, 2006. – С. 237-240.

3. *Ковальский Б. И.* Температурная стойкость моторных отработанных масел / Б. И. Ковальский, Н. Н. Малышева. – Вестник КГТУ : Машиностроение. Вып. 41. – Красноярск: НПУ КГТУ, 2006. – С. 31-36.

4. Патент 2366945 РФ, МПК GOIN 33/30. Способ определения температурной стойкости смазочных масел / Б. И. Ковальский, Н. Н. Малышева. – 2009, Бюл. № 25.

5. *Ковальский Б. И.* Результаты испытания минерального моторного масла на температурную стойкость / Б. И. Ковальский, С. Б. Ковальский, А. В. Берко, Н. Н. Малышева. – Известия Томского Политехнического Университета, 2009. Т. 316, № 2. – С. 46-50.

Авторы статьи

Шрам Вячеслав Геннадьевич, аспирант каф. «Топливное обеспечение и горюче-смазочные материалы» Института нефти и газа (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск). E-mail: shram18rus@mail.ru

Ковальский Болеслав Иванович, докт. техн. наук, профессор каф. «Топливное обеспечение и горюче-смазочные материалы» Института нефти и газа (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск). E-mail: Labsm@mail.ru

Безбородов Юрий Николаевич : докт. техн. наук профессор каф. «Топливообеспечение и горючесмазочные материалы» Института нефти и газа (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск). E-mail: Labsm@mail.ru

Малышева Наталья Николаевна канд.. техн. наук, доцент каф. «Топливное обеспечение и горюче-смазочные материалы» (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск) E-mail: Nataly.NM@mail.ru

Надейкин Иван Викторович, канд.. техн. наук, доцент каф. «Топливное обеспечение и горюче-смазочные материалы» (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск) E-mail: ivan_777_kray@mail.ru