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 МИНЕРАЛЬНОГО МОТОРНОГО МАСЛА М8-$Г_{2К}$. ЧАСТЬ 1

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 адсорбционные, хемосорбционные и химически модифицированные граничные слои на поверхностях трущихся деталей, повышающих нагрузку схватывания.

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 их отработки отбираются пробы масел для определения противоизносных свойств, что позволяет исследовать динамику их 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. Поэтому разработка методического обеспечения этого направления является актуальной задачей.

Цель исследования. Определить влияния продуктов температурной деструкции минерального моторного масла М8-$Г_{2К}$ в диапазоне температур от 140 до 300 °С и нагрузки на противоизносные свойства.

Методика исследования описана в работах [2-5] и предусматривает применение таких измерительных средств как прибор для термостатирования масел в диапазоне от 100 до 300 °С, малообъемный вискозиметр, фотометрическое устройство для прямого фотометрирования масел, трехшариковая машина трения со схемой “шар-цилиндр”.

Результаты исследований и их обсуждение. Моторное масло М8-$Г_{2К}$ является зимним и предназначено для смазывания высокофорсированных дизельных двигателей с наддувом, с добавлением многофункционального пакета присадок. Обладает отличными смазывающими свойствами, высокой термоокислительной стабильностью и способностью нейтрализации кислоты, образующейся в процессе эксплуатации двигателя. Данное масло термостатировалось в диапазоне температур от 140 до 300 °С с повышением температуры на 10 °С. Время испытания составило 8 часов, после чего определялась вязкость, испаряемость (летучесть), оптические свойства, по коэффициенту

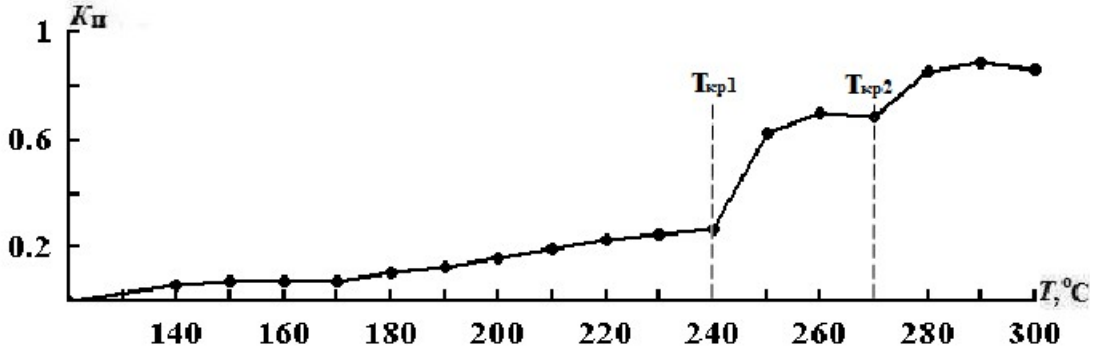


Рис. 1. Зависимости коэффициента поглощения светового потока от температуры термостатирования минерального моторного масла М8-$Г_{2К}$

поглощения светового потока $K_П$, противоизносные свойства на трехшариковой машине трения и параметры процессов, протекающих на фрикционном контакте.

Фотометрирование термостатированных масел проводилось при толщине фотометрируемого слоя 8 мм (рис. 1).

Согласно полученным данным зависимости коэффициента $K_П$ а имеют линейную зависимость в диапазоне температур от 140 до 240 °С. В диапазоне температур от 240 до 250 °С наблюдается резкое увеличение коэффициента поглощения светового потока $K_П$, в результате образования более оптически плотных продуктов деструкции, т.е. масло больше не может поглощать воздействующую на него тепловую энергию, происходит ее сброс, в результате образуются продукты деструкции разрыв межмолекулярных связей и частичная деструкция комплекта присадок. В температурной области от 250 до 270 °С наблюдается стабилизация коэффициента поглощения светового потока, но на более высоком уровне. Это может быть вызвано активацией присадок; преобладанием процессов изомеризации углеводородов над процессами деструкции. В диапазоне температур от 270 до 280 °С возникает повторное резкое увеличение коэффициента $K_П$ т.е. возникает вторая критическая температура при которой масло высвобождает избыток энергии. После дальнейшего увеличения температуры до 300 °С коэффициент $K_П$ вновь стабилизируется. В этом случае можно

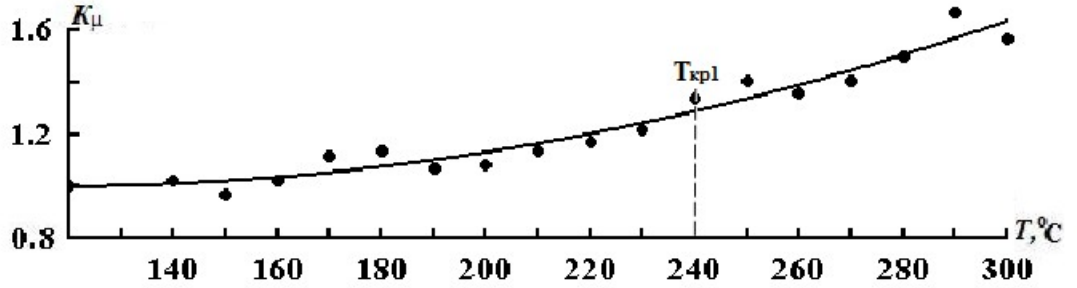


Рис. 2. Зависимость коэффициента вязкости от температуры термостатирования минерального моторного масла М8-$Г_{2К}$

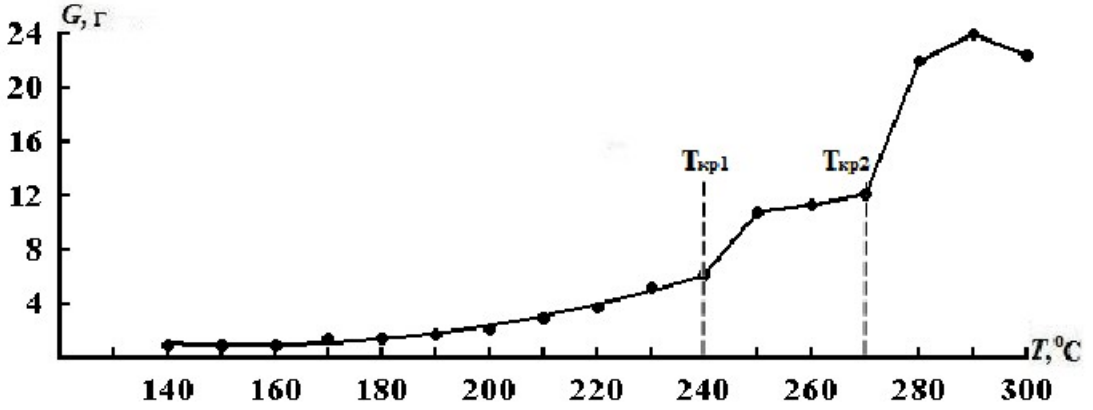


Рис. 3. Зависимость летучести от температуры термостатирования минерального моторного масла М8-$Г_{2К}$

утверждать, что процесс деструкции остановился.

Таким образом при термостатировании минерального масла М8-$Г_{2К}$ установлено две критические температуры $T_{кр}$ 240 и 270 °С, при которых происходит резкий сброс избыточной тепловой энергии, вызывающей резкое увеличение коэффициента $K_П$. Вязкость термостатированных масел оценивалась коэффициентом относительной вязкости, определяемым отношением вязкости термостатированного масла к вязкости товарного. Зависимость вязкости масла от температуры термостатирования имеет квадратичную зависимость (рис. 2). При температуре 300 °С она увеличивается на 57% по отношению к товарному маслу. Поскольку допустимое увеличение вязкости не должно превышать 30-35%, поэтому предельной температурой термостатирования является температура 240 °С, что совпадает с температурой $T_{кр2}$ (см. рис. 1).

Летучесть масла в диапазоне температур от 140 до 240 °С имеет экспоненциальную зависимость (рис. 3). Однако при температуре 250 °С летучесть резко увеличивается с 6,2 до 10,8 г. В интервале температур от 250 до 270 °С испаряемость масла незначительно возрастает. При температуре 280 °С летучесть снова резко увеличивается с 12,2 до 22 г. В диапазоне температур от 280 до 300 °С летучесть практически стабильна.

Сравнивая зависимости $K_П = f(T)$ и $G = f(T)$ (рис. 1 и 3) установлено резкое увеличение коэффициентов $K_П$ и G при критических температурах, т.е. сброс избыточной тепловой энергии определяет значения этих параметров.

Исследованиями влияния продуктов деструкции на вязкость (рис. 4) установлено, что до температуры $T_{кр1}$ вязкость изменяется по экспоненциальной зависимости, а в период между температурами $T_{кр1}$ и $T_{кр2}$ ее рост замедляется и при температуре > $T_{кр2}$ вязкость повторно увеличивается.

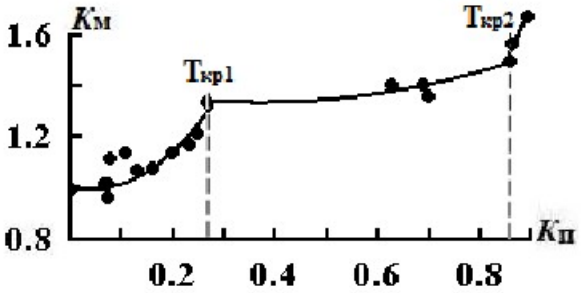


Рис. 4. Зависимости коэффициента относительной вязкости от коэффициента поглощения светового потока при термостатирования минерального моторного масла М8-$Г_{2К}$

Связь между параметрами $K_П$ и G исследована зависимостью $K_П = f(G)$ (рис. 5). Установлена кусочно-линейная зависимость $K_П = f(G)$, имеющая перегиб при температуре больше $T_{кр1}$, что говорит об явлении перераспределения избыточной тепловой энергии между продуктами деструкции и испарением т.е. при $K_П$ >0,7 ед. процессы испарения преобладают над процессами деструкции

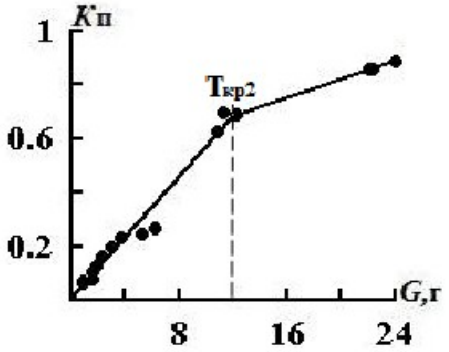


Рис. 5. Зависимости коэффициента поглощения светового потока от летучести при термостатирования минерального моторного масла М8-$Г_{2К}$

На основании изложенного установлено, что

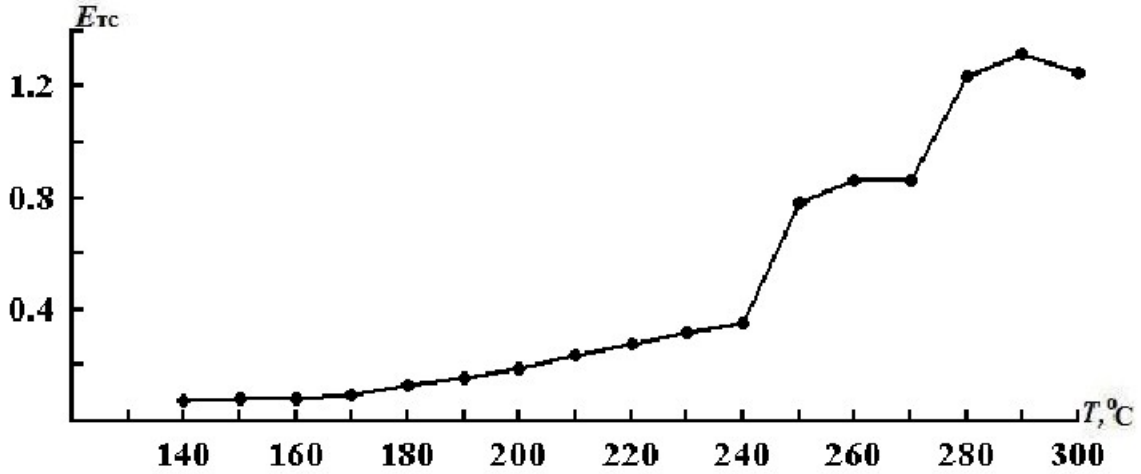


Рис. 6. Зависимости критерия температурной стойкости от температуры термостатирования минерального моторного масла М8-$Г_{2К}$:

сброс избыточной энергии происходит по двум каналам: изменению коэффициента $K_П$ и летучестью G, поэтому в качестве температурной стойкости предложен коэффициент $E_{ТС}$, определяемый 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 комплексным безразмерным показателем, а зависимость его от температуры термостатирования представлена на рис. 6. Показано, что зависимость $E_{ТС} = f(T)$ претерпевает изгибы при температурах 170, 240 и 270 °С, характеризующие поглощение избыточной энергии продуктами деструкции и испарения. Данная зависимость повторяет зависимость $K_П = f(T)$ т.е. процессы деструкции влияют одновременно

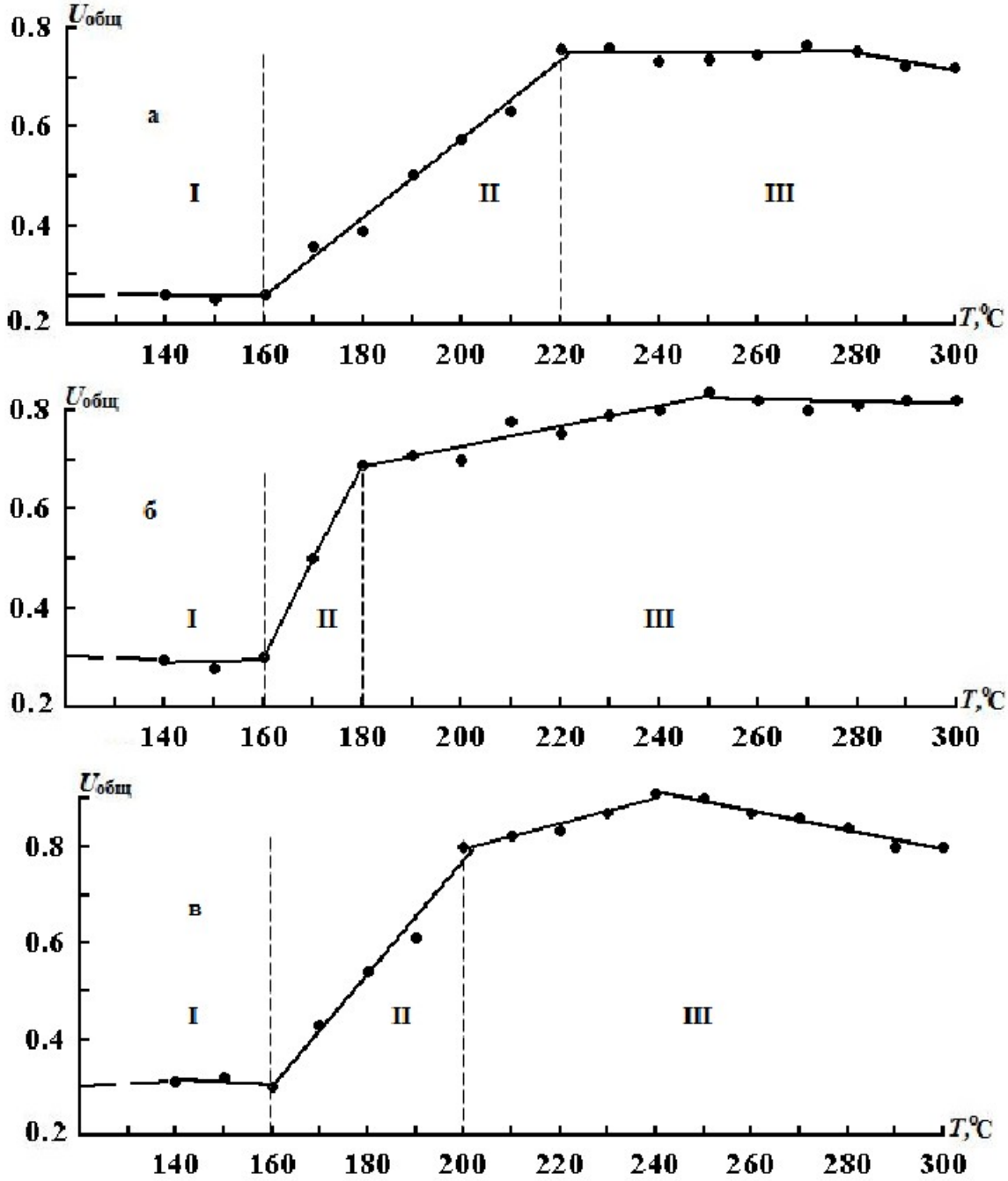


Рис. 7. Зависимости износа от температуры термостатирования минерального моторного масла М8-$Г_{2К}$ и нагрузки: а – 13Н; б –23Н; в –33Н

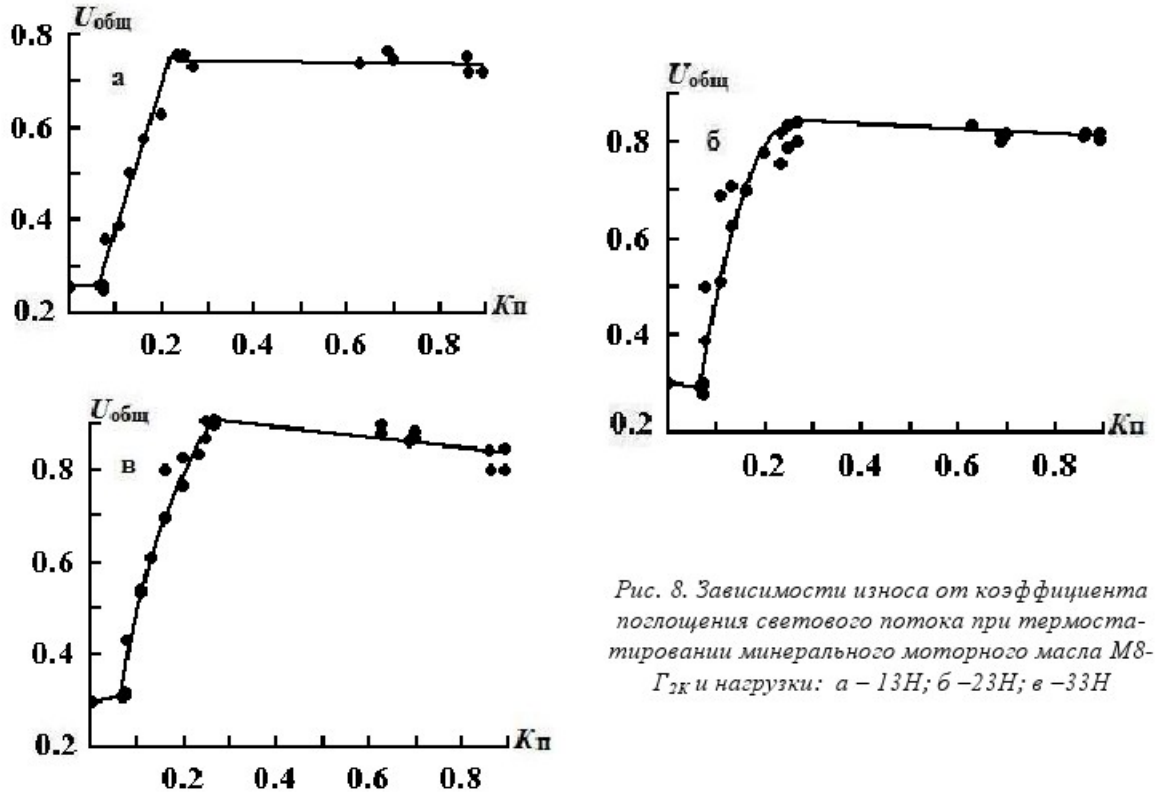


Рис. 8. Зависимости износа от коэффициента поглощения светового потока при термостатировании минерального моторного масла М8-$Г_{2К}$ и нагрузки: а – 13Н; б –23Н; в –33Н

на показатели $K_П$, K_μ, G.

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 средне арифметиче-

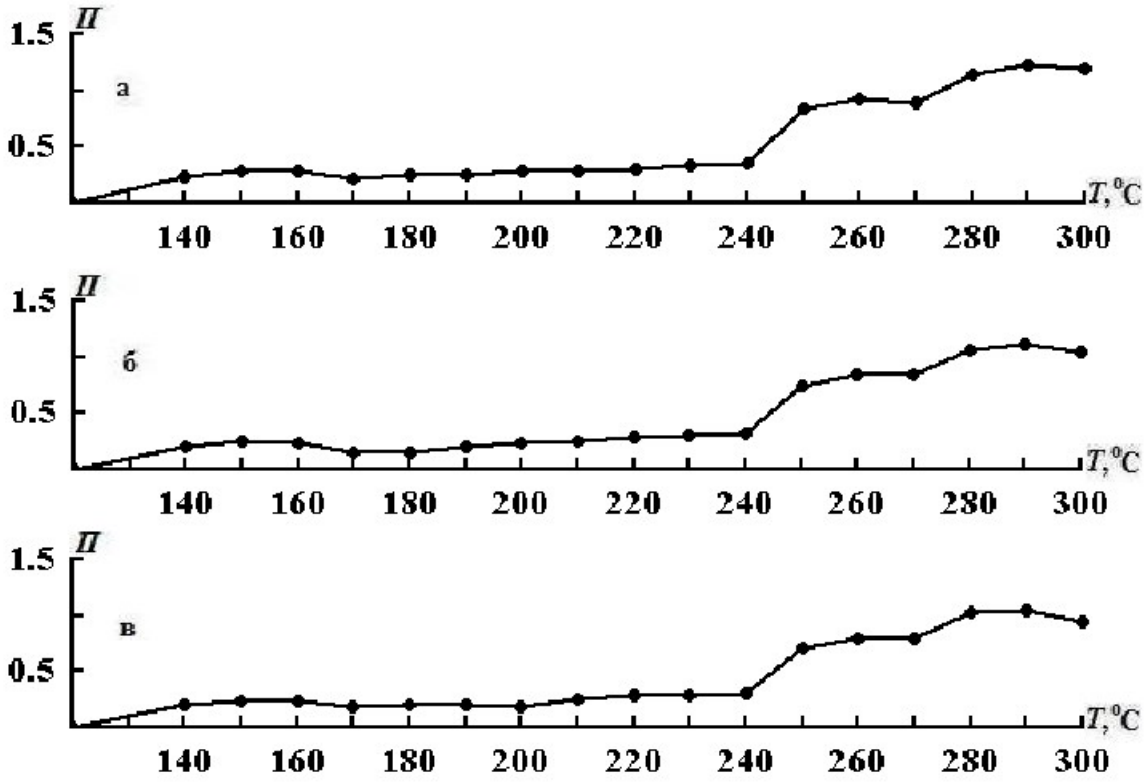


Рис. 9. Зависимости критерия противоизносных свойств от температуры испытания минерального моторного масла М8-$Г_{2К}$ и нагрузки: а – 13Н; б –23Н; в –33Н

скому 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 I участке (диапазон температур от 140 до 160 °С) износ незначительно изменяется, поскольку при этих температурах деструкции масла еще нет, и составляет при нагрузках: 13Н ≈ 0,254 мм; 23Н ≈ 0,290 мм; 33Н ≈ 0,310 мм. На II участке износ увеличивается, но скорость износа и диапазон температур для каждой нагрузки различен, что говорит о наличии в масле продуктов деструкции. Так, износ увеличился для нагрузок: 13Н (рис. 7а) (диапазон температур от 160 до 220 °С), на 0,495 мм; 23Н (рис. 7б) (диапазон температур от 160 до 180 °С) на 0,390 мм; 33Н (рис. 7в) (диапазон температур от 160 до 200 °С) на 0,490 мм. На участке III при нагрузках 13 и 23Н износ практически стабилизируется, но на разных уровнях: 13Н ≈ 0,740 мм; 23Н ≈ 0,790 мм; 33Н 23Н ≈ 0,830 мм.

Зависимости диаметра пятна износа от коэффициента $K_П$, характеризующего концентрацию продуктов деструкции, и нагрузки представлены на рис. 8. Показано, что при малых концентрациях продуктов температурной деструкции противоизносные свойства термостатированных масел понижаются. Однако максимальное увеличение износа для всех нагрузок наступает при $K_П = 0{,}23$ ед. или при температуре больше $T_{кр1}$. Дальнейшее увеличение концентрации продуктов температурной деструкции ($K_П$) вызывает стабилизацию противоизносных свойств при нагрузках 13 и 23Н и незначительное повышение при нагрузке 33Н (износ уменьшился на ≈ 0,1 мм).

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

$$П = \frac{K_П}{U}, \qquad (8)$$

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

Данный критерий (рис. 9, 10) характеризует условную концентрацию продуктов деструкции на номинальной площади фрикционного контакта. Показано, что зависимости критерия противоизносных свойств от нагрузки претерпевает изгиб при температуре 240 °С, а его зависимости от коэффициента поглощения светового потока имеет 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 $\quad П = \mathbf{1{,}32}K_П$, (9)

P=23Н $\quad П = \mathbf{1{,}22}K_П$, (10)

P=33Н $\quad П = \mathbf{1{,}15}K_П$, (11)

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

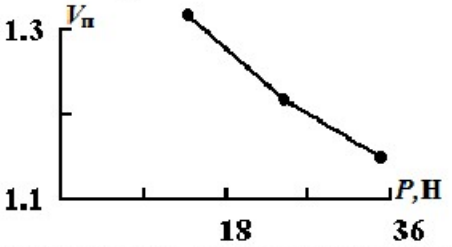
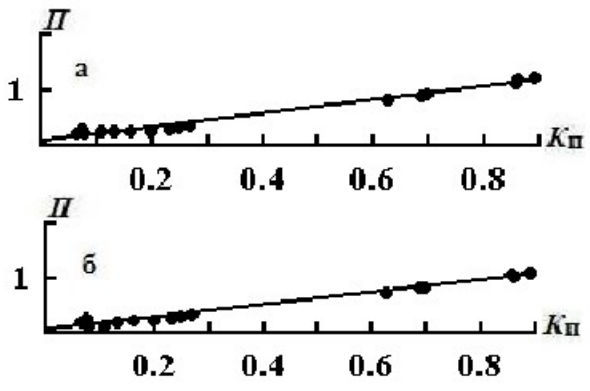


Рис. 11. Зависимость скорости изменения критерия противоизносных свойств от нагрузки

Влияние процессов температурной деструкции и нагрузки на изменение противоизносных свойств исследовалось давлением в контакте (рис. 12). Установлено, что давление в контакте имеет максимум при низких температурах термостатирования масла М8-$Г_{2К}$ независимо от нагрузки. Для нагрузки 13Н в температурном диапазоне от 140 до 210 °С давление в контакте уменьшается. Для нагрузок 23 и 33Н давление в контакте уменьшается в температурном диапазоне от 140 до 220 °С. Дальнейшее повышение температуры



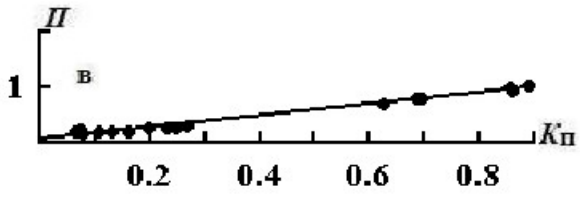


Рис. 10. Зависимости критерия противоизносных свойств коэффициента поглощения светового потока (П) минерального моторного масла М8-$Г_{2К}$ и нагрузки: а – 13Н; б –23Н; в –33Н

термостатирования приводит к стабилизации давления независимо от нагрузки, но на разных уровнях. Так при нагрузки 13Н давление в контакте стабилизируется при $q \approx 30$ Н/мм^2, 23Н – $q \approx 45$ Н/мм^2, 33Н – $q \approx 55$ Н/мм^2. Показано,

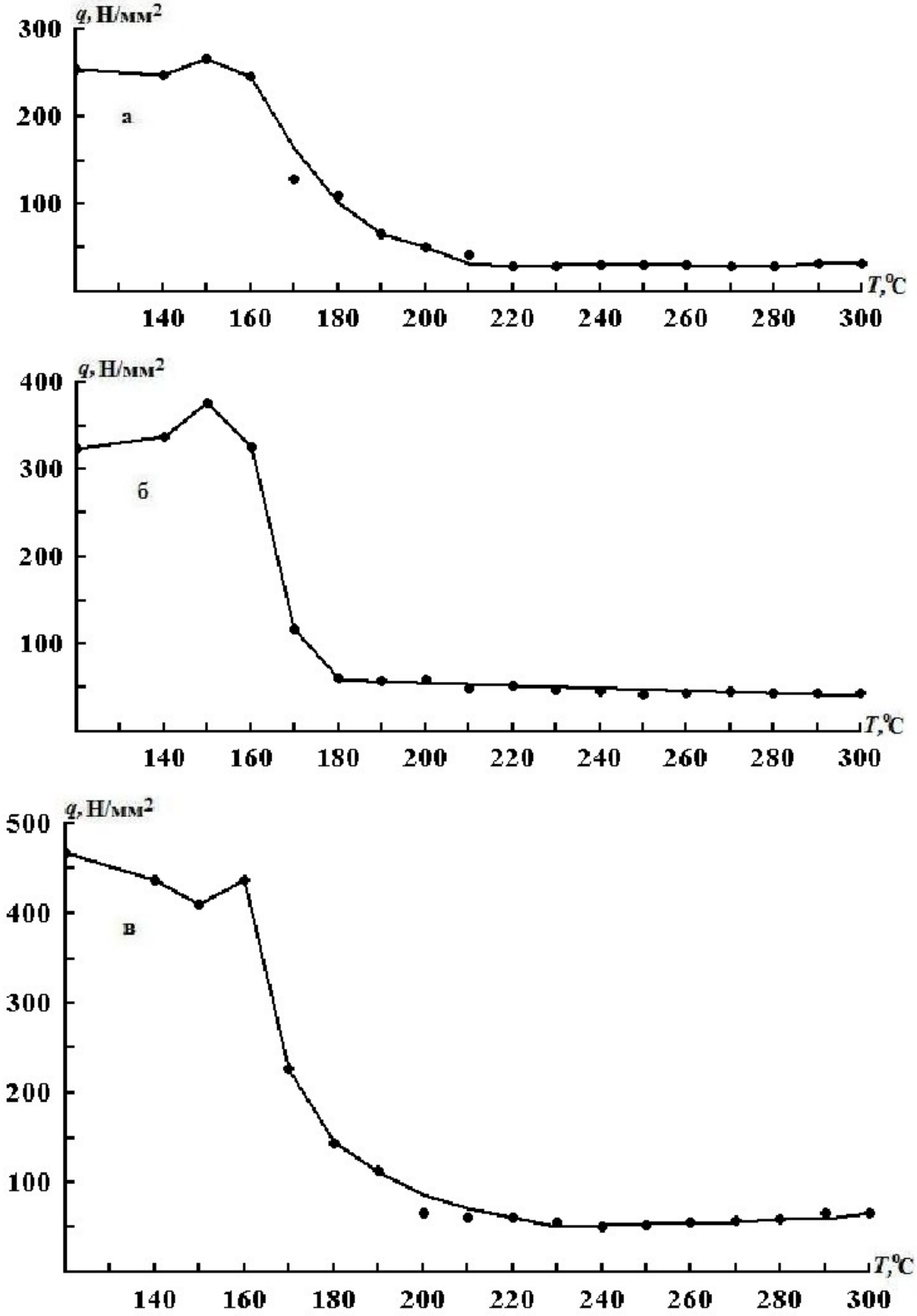


Рис. 12. Зависимости давления на фрикционном контакте от температуры термостатирования минерального моторного масла М8-$Г_{2К}$ и нагрузки: а – 13Н; б –23Н; в –33Н

что с увеличением нагрузки давление в контакте возрастает.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. При термостатировании минерального моторного масла М8-$Г_{2К}$ в диапазоне температур от 140 до 300 °С установлены две критические температуры (240 и 270 °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 площади 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 $Т_{кр1}$, 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