ТРИБОТЕХНИКА

УДК 621.43-4

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДУКТОВ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ И НАГРУЗКИ НА ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА СИНТЕТИЧЕСКОГО МОТОРНОГО МАСЛА ESSO ULTRON 5W-40. ЧАСТЬ 3

Введение. Механизм деструкции смазочных материалов различных базовых основ изучен недостаточно. Исследование связи между процессами деструкции базовой основы, происходящими в смазочных материалах, и присадками является важным моментом в обосновании их ресурса.

Главным фактором, влияющим на срок службы любого масла, следует считать температуру на поверхностях трения. Тепловой режим работы в процессе эксплуатации имеет для долговечности масла такое же значение, как для долговечности деталей машин их напряженное состояние под действием эксплуатационных нагрузок [1].

Наиболее тяжелым для работы механических узлов является режим граничного трения. В этих условиях способность слоев смазочного материала нести нагрузку в контакте поверхностей трения зависит от взаимодействия смазочного материала с рабочими деталями механизмов (физическая адсорбция, хемосорбция). Решающее влияние на указанные процессы оказывает развивающаяся при трении температура, вызывающая нагревание тонких поверхностных слоев сопряженных тел и разделяющего их слоя смазочного материала.

Механизм температурной стойкости граничных слоев смазочного материала рассмотрен в работах Боудена и Тейбора. Причинами изменения коэффициента трения и характера скольжения, наблюдаемых при критической или переходной температурах для данного сочетания металлов и смазочного материала в условиях объемного нагрева, являются дезориентация и десорбция граничных смазочных слоев. При высоких температурах эти процессы ускоряются, что вызывает окисление поверхностей и смазочного материала, т.е. изменяются свойства граничных слоев.

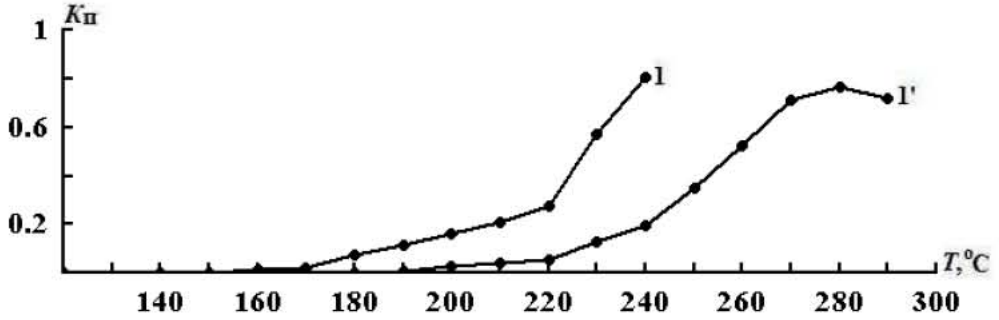

Рис. 1. Зависимости коэффициента поглощения светового потока от температуры термостатирования синтетического моторного масла ESSO Ultron 5W-40 SL/CF:
(фотометрирование при толщине фотометрируемого слоя: 1 – 8 мм; 1′ – 2 мм)

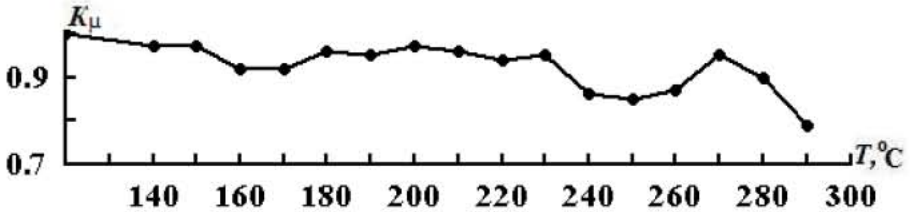

Рис. 2. Зависимость коэффициента вязкости от температуры термостатирования синтетического моторного масла ESSO Ultron 5W-40 SL/CF

Рассматривая явления, происходящие в поверхностных слоях, с позиций теорий структурной приспосабливаемости и самоорганизации в трибосистемах [2,3], необходимо отметить, что в процессе взаимодействия деталей в цилиндре двигателя, работающих в жестких условиях граничного трения, происходит формирование квазиравновесных защитных слоев и установившейся шероховатости, способных стабилизировать темп разрушения и восстановления вторичных структур.

Влияние температуры на долговечность трибосопряжений определяется самоорганизацией такой системы, и параметрами внешних воздействий. Самоорганизация любой трибосистемы определяется скоростью образования защитных граничных слоев, параметрами трения, обеспечивающими существование адсорбционных, хемосорбционных и модифицированных слоев, и температурой их разрушения. Поэтому термостойкость этих слоев является основой, определяющей надежность трибосистемы.

Методика исследования описана в работах [4-7] 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. Моторное масло Esso Ultron SAE 5W-40 SL/CF является всесезонным, универсальным полностью синтетическое, обладающим хорошими антифрикционными свойствами и предназначено для тяжелых условий работы, класс вязкости SAE 5W-40, группа эксплуатационных свойств SL для бензиновых двигателей, CF – для дизельных. Замечательная текучесть обеспечивает очень быструю смазку двигателя и тем самым существенно снижает износ при холодном пуске. Данное масло термостатировалось в диапазоне температур от 140 до 290 °С с ростом температуры 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.

Прямое фотометрирование термостатированных масел проводилось при толщинах фотометрируемого слоя 8 и 2 мм, т.к. при температурах выше 240 °С наступает низкая чувствительность фотометра при толщине 8 мм (рис. 1).

Согласно полученным данным зависимости коэффициента поглощения светового потока при толщинах фотометрируемого слоя 8 и 2 мм имеют линейные участки в диапазоне температур до 220 °С, от 220 до 240 °С и от 240 до 270 °С различающиеся скоростью изменения коэффициента поглощения светового потока $K_П$, в результате об-

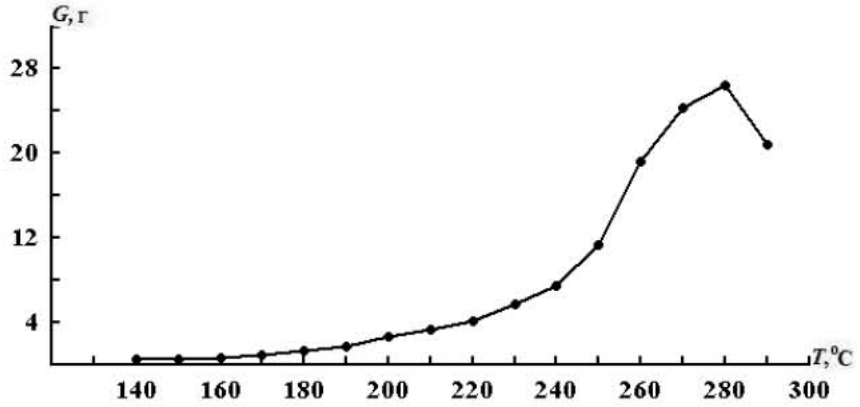

Рис. 3. Зависимость летучести от температуры термостатирования минерального моторного масла ESSO Ultron 5W-40 SL/CF

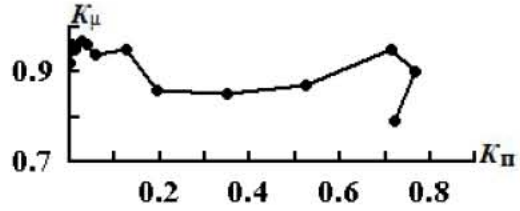

Рис. 4. Зависимости коэффициента относительной вязкости от коэффициента поглощения светового потока при термостатирования синтетического моторного масла ESSO Ultron 5W-40 SL/CF при толщине фотометрируемого слоя 2 мм.

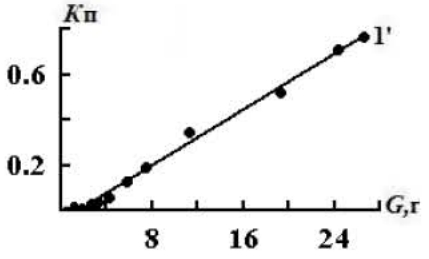

Рис. 5. Зависимости коэффициента поглощения светового потока от летучести при термостатирования синтетического моторного масла ESSO Ultron 5W-40 SL/CF при толщине фотометрируемого слоя 2 мм.

разования более оптически плотных продуктов деструкции, т.е. в процессе деструкции образуются несколько видов продуктов различной оптической плотностью. При дальнейшем увеличении температуры до 290 °С коэффициент $K_П$ стабилизируется. В этом случае можно утверждать, что процесс деструкции остановился. Температуры, при которых происходит изгиб зависимости $K_П = f(T)$ названы критическими, т.к. при этом происходит сброс избыточной тепловой энергии, поглощаемой продуктами деструкции резко изменяющие величину коэффициента $K_П$.

Вязкость термостатированных масел оценивалась коэффициентом относительной вязкости, определяемым отношением вязкости термостатированного масла к вязкости товарного масла. Зависимость относительной вязкости масла от температуры термостатирования имеет линейный характер (рис. 2). На всем промежутке термостатирования масла происходит уменьшение вязкости и при температуре 290 °С она уменьшается на 21% по отношению к товарному маслу, что обусловлено испарением легких фракций масла.

Летучесть масла в диапазоне температур от 140 до 270 °С имеет экспоненциальную зависимость (рис. 3). Начиная с температуры термостатирования 250 °С, летучесть резко увеличивается и составляет: при 250 °С – 3,8 г; при 260 °С – 8 г; при 270 °С – 5 г, а при температуре 290 °С летучесть замедляется, и она составила 20 г.

Влияние продуктов деструкции на вязкость исследовалось зависимостью от коэффициента $K_П$ (рис. 4). Установлено, что до значения коэффициента $K_П$ =0.16 ед. (температура испытания 230 °С) зависимость $K_\mu = f(K_П)$ линейно стабильна т.е. продукты деструкции не оказывают влияние на вязкость. При значении $K_П$=0.193 ед. (температура испытания 240 °С) вязкость уменьшается на 11%, т.е продукты деструкции начинают оказывать влияние на вязкость, однако при температурах 250 и 260 °С $K_П$=0.32 и $K_П$=0.5 ед. вязкость стабилизируется, что указывает на окончание деструкции вязкостной присадки. Дальнейшее увеличение температуры (270 °С) вызывает незначительное увеличение вязкости, а затем ее снижение на 21% за счет деструкции базовой основы.

Влияние летучести масла на значения коэффициента $K_П$. исследовано зависимостью $K_П = f(G)$ (рис. 5). Показано, что зависимость $K_П = f(G)$ имеет линейный характер.

В результате полученных данных предложен коэффициент температурной стойкости $E_{ТС}$ моторных масел, 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.

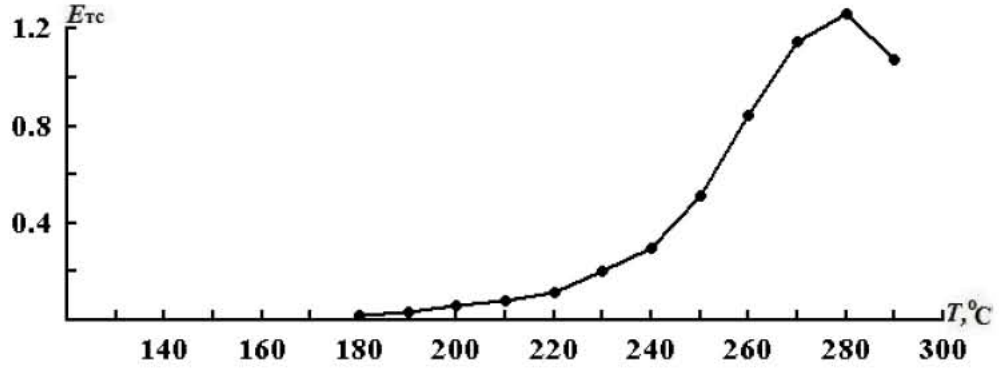

Рис. 6. Зависимости критерия температурной стойкости от температуры термостатирования синтетического моторного масла ESSO Ultron 5W-40 SL/CF при толщине фотометрируемого слоя 2 мм

Коэффициент температурной стойкости моторного масла является безразмерным, 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 220, 240 и 270 °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 средне 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 зависи-

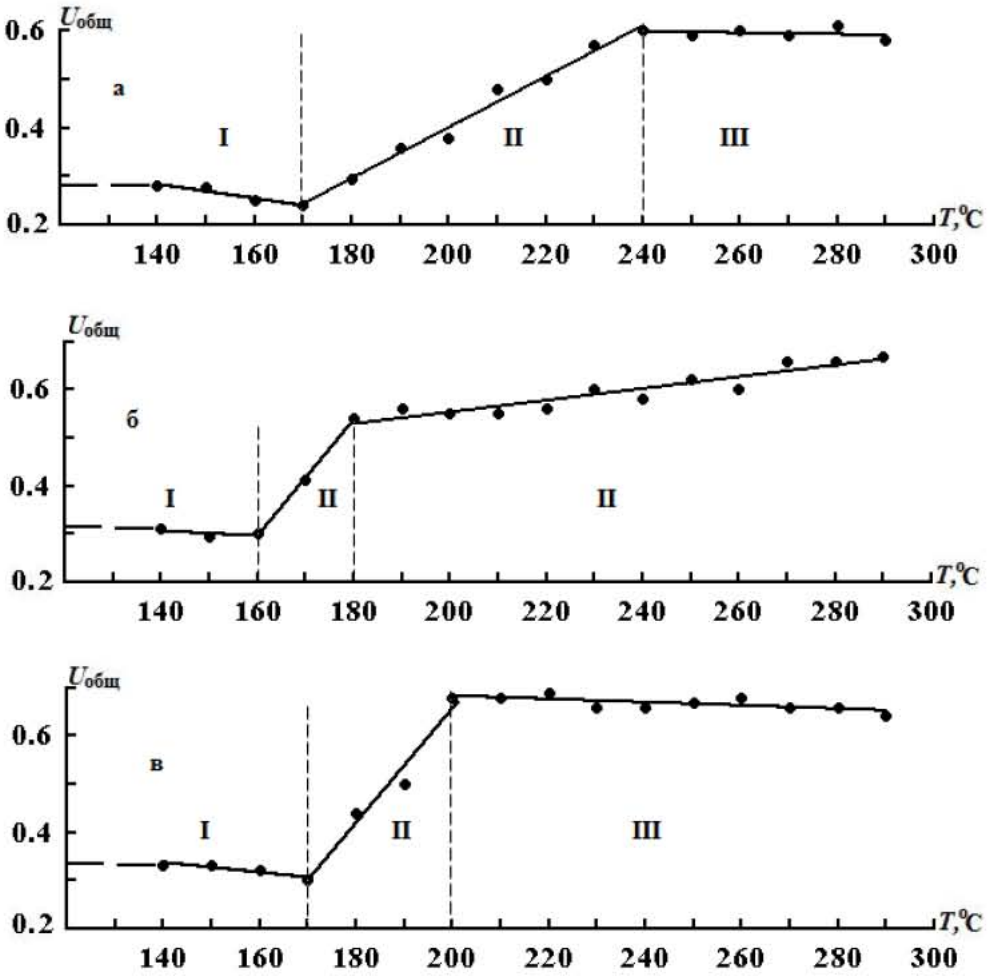

Рис. 7. Зависимости износа от температуры термостатирования синтетического моторного масла ESSO Ultron 5W-40 SL/CF и нагрузки: а – 13Н; б – 23Н; в – 33Н

мости $U = f(T)$ имеют 3 участка различной интенсивностью изнашивания. Причем характер изменения этих участков идентичен для всех нагрузок. На первом участке износ незначительно изменяется, поскольку при этих температурах деструкции масла еще нет, и составляет при нагрузках: 13Н ≈ 0,270 мм (диапазон температур от 140 до 170 °С); 23Н ≈ 0,310 мм (диапазон температур от 140 до 160 °С); 33Н ≈ 0,330 мм (диапазон температур от 140 до 170 °С). На втором участке износ увеличивается, но скорость износа и диапазон температур для каждой нагрузки различен, что объясняется наличием продуктов деструкцией и влиянием нагрузки на процессы, протекающие фрикционном контакте. Так, износ увеличился для нагрузок: 13Н (рис. 7а) (диапазон температур от 170 до 250 °С), на 0,340 мм; 23Н (рис. 7б) (диапазон температур от 160 до 180 °С) на 0,230 мм; 33Н (рис. 7в) (диапазон температур от 170 до 200 °С) на 0,370 мм. На третьем участке при нагрузках: 13Н износ незначительно уменьшается, 23Н – износ увеличивается, а при 33Н он стабилизируется, однако при 290 °С износ составляет при нагрузках: 13Н –0,59 мм; 23Н – 0,66 мм; 33Н – 0,705.

На основе полученных данных можно предположить, что на каждом из трех участках происходят различные процессы, которые определяются концентрацией и составом продуктов деструкции, т.е. свойствами, образующихся граничных слоев. Поэтому первый участок может определять температурные границы, адсорбционных граничных слоев, второй участок – определяет температурные границы хемосорбционных граничных слоев, а третий участок – температурные границы модифицированных слоев.

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 нагрузке 13Н наступает при коэффициенте $K_П = 0{,}193$ ед. (температура 240 °С). Для нагрузок 23 и 33Н максимальный износ наступает при коэффициентах $K_П = 0{,}027$ и $K_П = 0{,}01$ ед. (температуры 200 и 190 °С) соответственно. Дальнейшее увеличение концентрации продуктов

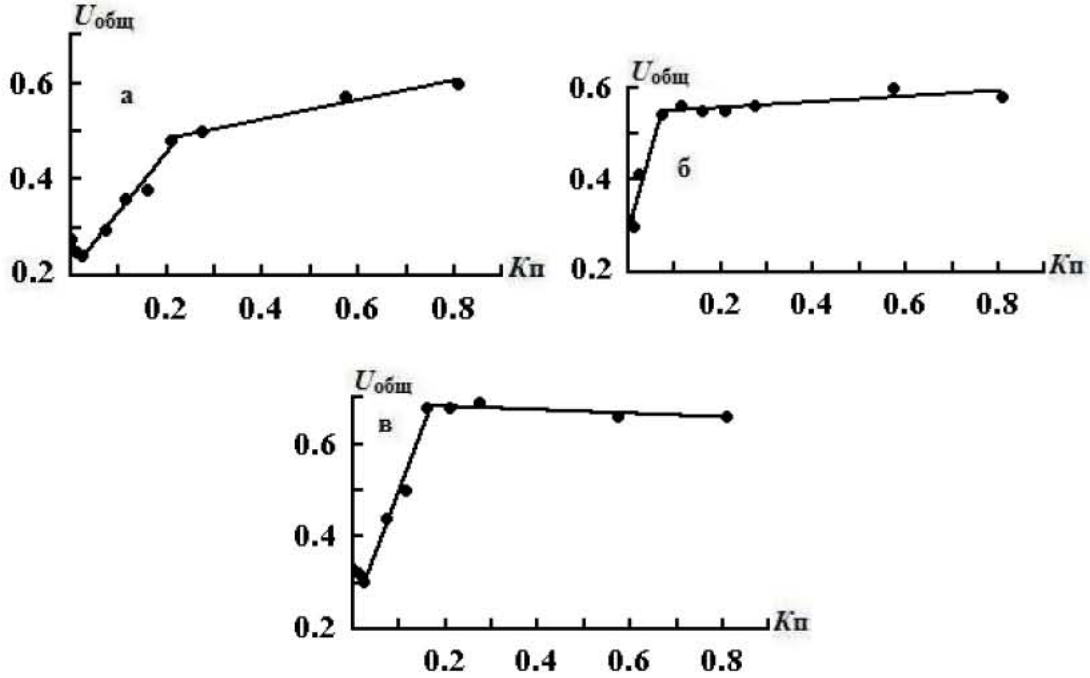

Рис. 8. Зависимости износа от коэффициента поглощения светового потока при термостатировании синтетического моторного масла ESSO Ultron 5W-40 SL/CF при толщине фотометрируемого слоя 2 мм и нагрузки: а – 13Н; б – 23Н; в – 33Н

температурной деструкции ($K_П$) не оказывает влияние на изменение противоизносных свойств и приводит к их стабилизации.

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 характеризует условную концентрацию продуктов деструкции на номинальной площади фрикционного контакта (рис. 9, 10).

Показано, что зависимости критерия противоизносных свойств от нагрузки претерпевает изгиб

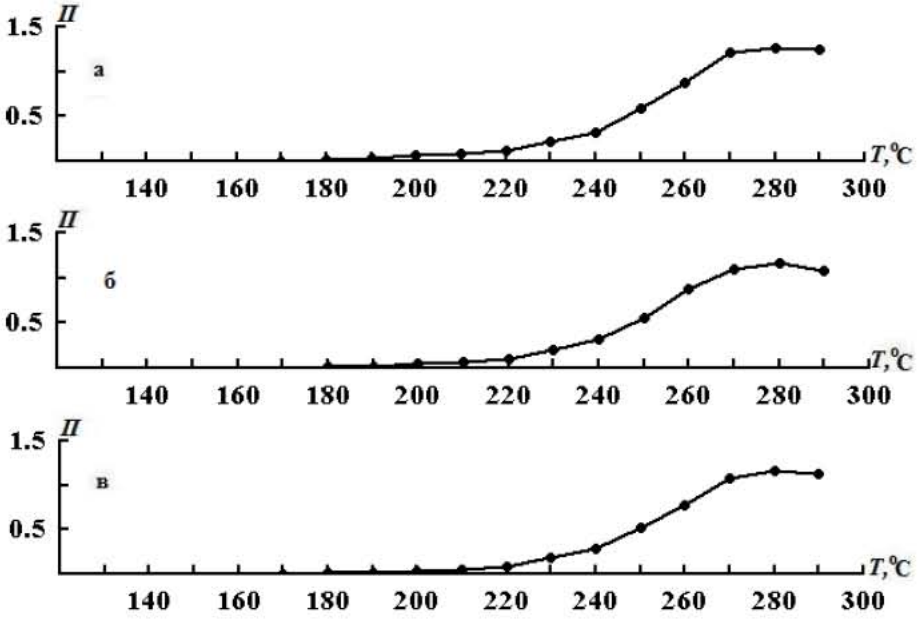

Рис. 9. Зависимости критерия противоизносных свойств от температуры термостатирования синтетического моторного масла ESSO Ultron 5W-40 SL/CF при толщине фотометрируемого слоя 2 мм и нагрузки: а – 13Н; б – 23Н; в – 33Н

при температурах 220, 240 и 270 °С, а его зависимости от коэффициента поглощения светового потока имеет линейный характер независимо от толщины фотометрируемого слоя. Причем чем, выше величина нагрузки, тем ниже противоизносные свойства при одном и том же значении $K_П$.

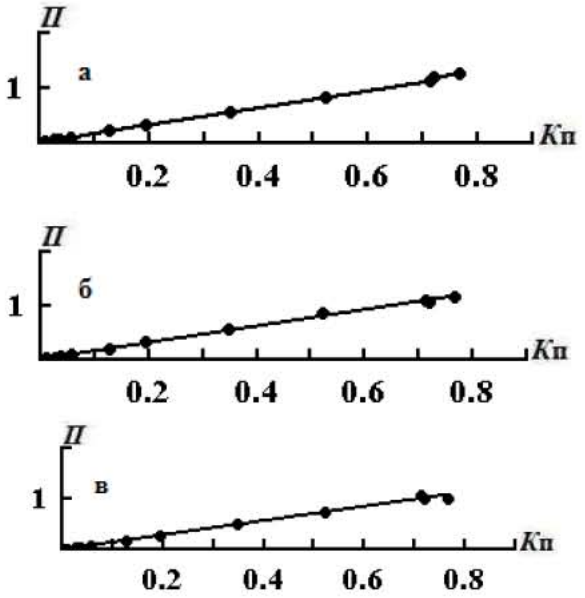

Рис. 10. Зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока при термостатировании синтетического моторного масла ESSO Ultron 5W-40 при толщине фотометрируемого слоя 2 мм и нагрузки: а – 13Н; б – 23Н; в – 33Н

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

$$P\text{=}13\text{Н} \qquad П = 2{,}14K_П, \qquad (9)$$

$$P\text{=}23\text{Н} \qquad П = 1{,}74K_П, \qquad (10)$$

$$P\text{=}33\text{Н} \qquad П = 1{,}44K_П, \qquad (11)$$

Коэффициенты 2,14; 1,74; 1,44 характеризуют скорость изменения критерия противоизносных свойств $V_П$, зависимость которой от нагрузки 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.

Влияние процессов температурной деструкции и нагрузки на изменение противоизносных свойств исследовалось зависимостью давления в контакте (рис. 12) от температуры термостатирования.

Установлено, что давление в контакте имеет максимум в начальный период термостатирования масла Esso Ultron 5W-40, для нагрузок: 13Н при температуре 160 °С и 23Н при температуре 150 °С, 33Н – 170 °С.

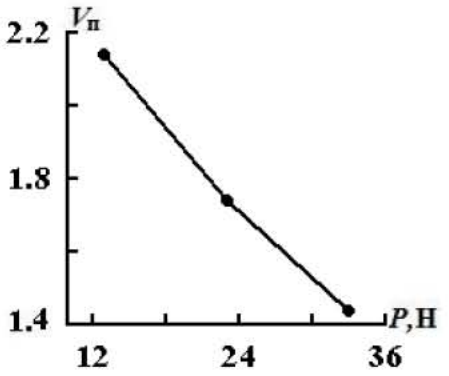

Рис. 11. Зависимость скорости изменения критерия противоизносных свойств от нагрузки

Дальнейшее увеличение температуры независимо от нагрузки приводит сначала к резкому уменьшению давления в контакте, а затем и к его стабилизации, но на разных уровнях: для нагрузки 13Н $q \approx 55$ Н/мм^2, 23Н – $q \approx 75$ Н/мм^2, 33Н – $q \approx 85$ Н/мм^2.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. При термостатировании синтетического моторного масла ESSO Ultron 5W-40 SL/CF в диапазоне температур от 140 до 290 °С установлены три критические температуры (220, 220 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 $T_{кр1}$, а затем стабилизируются, что объясняется образованием на поверхностях трения хемосорбционных граничных слоев.

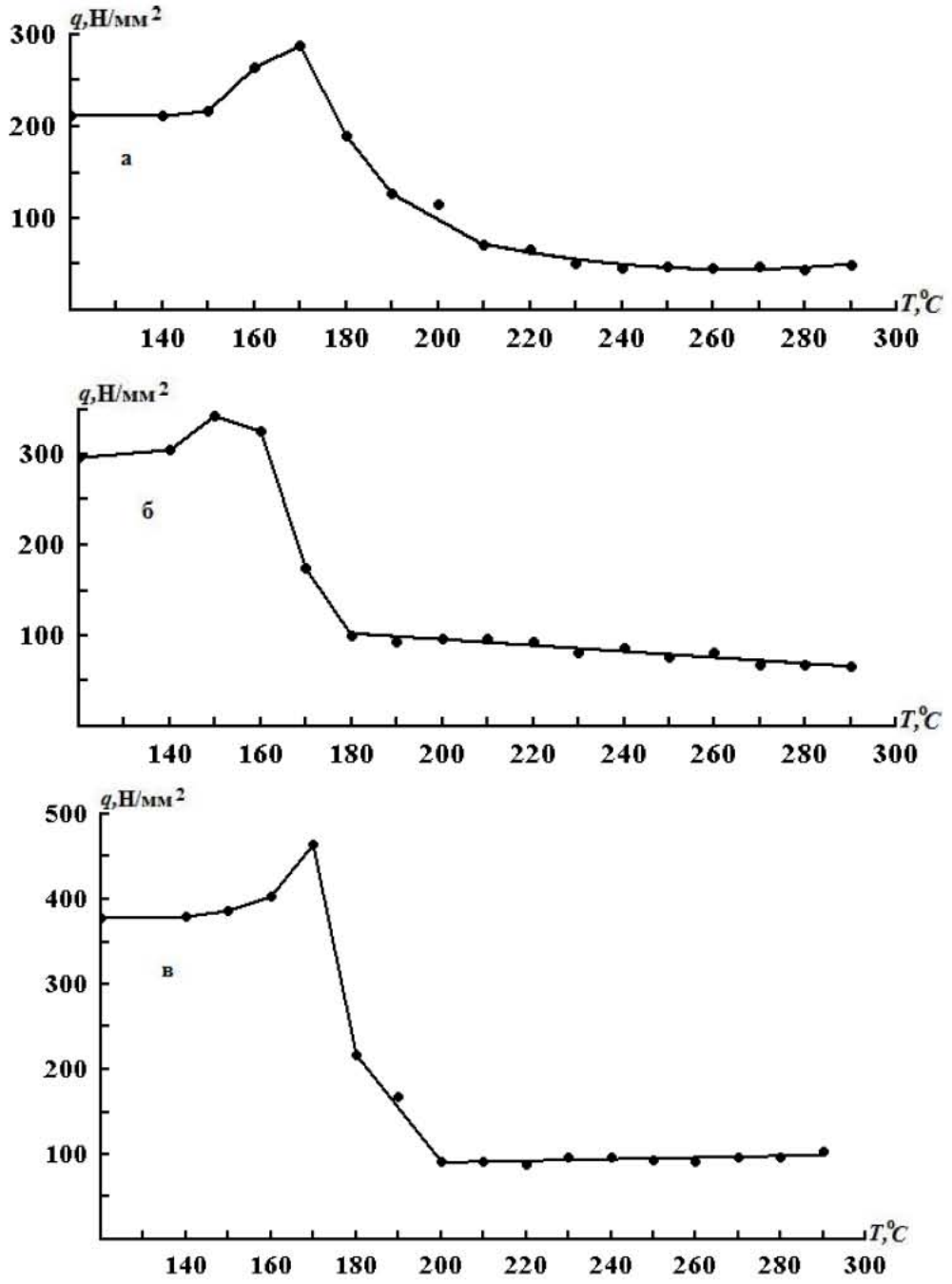

Рис. 12. Зависимости давления на фрикционном контакте от температуры термостатирования синтетического моторного масла ESSO Ultron 5W-40 и нагрузки:а – 13Н; б – 23Н; в – 33Н

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Розенберг, Ю.А.* Влияние смазочных материалов на долговечность и надежность деталей машин / Ю.А. Розенберг. – М.: Машиностроение, 1970 – 315 с.

2. *Канарчук, В.Е.* Адаптация материалов к динамическим воздействиям / В.Е. Канарчук. – Киев.: Наукова думка, 1986.

3. *Костецкий, Б.И.* Надежность и долговечность машин / Б.И. Костецкий, Н.Г. Носовский, Л.И. Бершадский, А.К. Караулов. – Киев.: Наукова думка, 1976.

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

5. *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.

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

7. *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 Института нефти и газа (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск). E-mail: shram18rus@mail.ru

Ковальский Болеслав Иванович, докт. техн. наук, проф. 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, проф. каф. «Топливообеспечение и горючесмазочные материалы» Института нефти и газа (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск). E-mail: Labsm@mail.ru

Сокольников Александр Николаевич канд. техн. наук, зав. каф. «Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов» (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск) E-mail: Labsm@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