

**ТРИБОТЕХНИКА**

УДК 629.113.012.26

В.И. Верещагин, Б.И. Ковальский, М.М. Рунда, В.Г. Шрам, А.В. Берко

**ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА СТАРЕНИЯ МОТОРНОГО МАСЛА  
RAVENOL VSI 5W-40 SM/CF НА ЕГО ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА**

Решение проблемы эффективного использования моторных масел затруднено в виду отсутствия методической базы и средств контроля предельного их состояния в процессе эксплуатации двигателей внутреннего сгорания, однако существующая система планово-предупредительных ремонтов предусматривает смену масел производить по пробегу или наработке в моточасах техники. Наряду со своей простотой такая система направлена на повышение эффективности применения смазочных материалов, не учитывая фактических условий и режимов эксплуатации, техническое состояние техники и систему доливов. Поэтому поиск новых подходов к решению этой проблемы является актуальным направлением.

Цель работы – исследование процесса старения синтетического моторного масла Ravenol VSI 5W-40 SM/CF в двигателе внутреннего сгорания за нормативный пробег 10000 км.

Испытуемое моторное масло является синтетическим, всесезонным и универсальным, класс вязкости 5W – 40, группа эксплуатационных свойств SM – для бензиновых двигателей и CL – для дизельных.

Методика исследования заключалась в периодическом отборе проб работавшего масла из двигателя массой 30 граммов с последующим их прямым фотометрированием, измерением вязкости и испытанию на трёхшариковой машине трения со схемой трения «шар – цилиндр» [1]. В качестве образцов применялись шары диаметром 9,5 мм от шарикоподшипника №204 (ГОСТ 8338-57) и цилиндр №7208 от роликоподшипника (ГОСТ 333-59) диаметром 80 мм. Параметры выбраны постоянными и составили: нагрузка 13Н, скорость скольжения 0,68 м/с температура испытания  $80 \pm 1^\circ\text{C}$ . Параметром износа принято средне арифметическое значение диаметра пятна износа измеренных на трёх шарах. Особенностью машины трения является исследование механохимических процессов, протекающих на площади фрикционного контакта при граничном трении скольжения с помощью пропускания постоянного тока от внешнего стабилизированного источника питания 3В через один из шаров [2]. Величина тока 100 мкА задавалась при неподвижной паре трения, а в процессе трения через преобразователь записыва-

лась на компьютере в виде диаграммы, по которой можно судить об интенсивности формирования защитных граничных слоёв на поверхности трения.

Изменение свойств моторного масла в процессе эксплуатации оценивалось по коэффициенту поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$ , измеряемому прямым фотометрированием работавшего масла, коэффициенту относительной вязкости  $K_{\text{в}}$ , определяемому отношением вязкости работавшего масла к вязкости товарного масла и его противозносным свойствам [3,4]. Так, за 10242 км пробега (S) оптические свойства работавшего масла (рис.1) изменились до 0,27 ед., а вязкость уменьшилась на 25 %.

Зависимость  $K_{\text{п}} = f(s)$ , имеет два линейных участка, первый, определяет начало окисления масла, второй – характеризует более интенсивное увеличение коэффициента  $K_{\text{п}}$  за счёт образования продуктов старения с большей оптической плотностью. Если продлить второй линейный участок зависимости  $K_{\text{п}} = f(s)$  до пересечения с осью абсцисс, то точка пересечения будет характеризовать начало образования оптически более плотных продуктов старения. В данном случае после 4000 км пробега начинается образование таких продуктов, которые не задерживаются системой фильтрации и вызывают изгиб зависимости  $K_{\text{п}} = f(s)$ . Время начала образования таких продуктов является диагностическим параметром не только состояния моторного масла, но и системы фильтрации и может применяться как для сравнения различных масел, так и обоснования его ресурса. Наличие второго участка зависимости  $K_{\text{п}} = f(s)$  подтверждается центрифугированием проб работавших масел с последующим фотометрированием. Так, после пробега автомобиля 9742 км коэффициент  $K_{\text{п}} = 0,26$  ед., а после центрифугирования он стал 0,093 ед. Такое различие объясняется наличием нерастворимых в масле примесей, которые выпали в осадок после центрифугирования.

При центрифугировании последней пробы масла коэффициент  $K_{\text{п}}$  изменился от 0,27 до 0,1 ед.

Оба участка зависимости  $K_{\text{п}} = f(s)$  описыва-

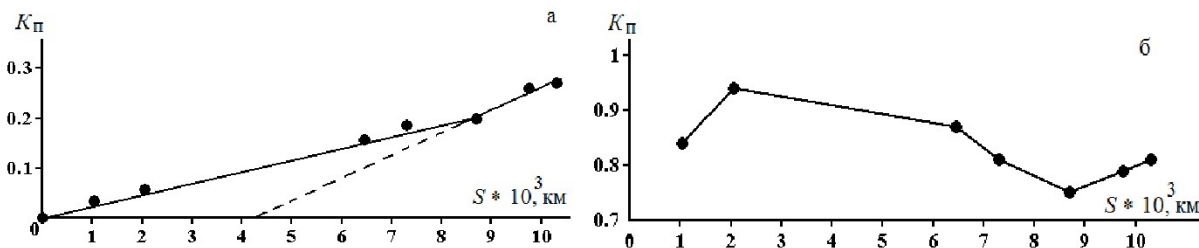


Рис. 1. Зависимость коэффициентов поглощения светового потока  $K_n$  (а) и относительной вязкости  $K_\mu$  (б) от пробега автомобиля

ются уравнением:

$$K_n = aS, \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент, характеризующий скорость загрязнения моторного масла, 1/км;  $S$  – пробег автомобиля, км.

Регрессионные уравнения имеют вид:

для первого участка:

$$K_n = 2,34 \cdot 10^{-2} S, \quad (2)$$

для второго участка:

$$K_n = 4,56 \cdot 10^{-2} (S-4200), \quad (3)$$

Вязкость работавшего синтетического моторного масла в процессе эксплуатации изменяется неодинаково за 1046 км пробега уменьшилась на 16 % (рис.1, б), а при пробеге 2057 км вязкость уменьшилась, по сравнению с товарным маслом, на 6 %.

Такое изменение вязкости может объясняться изменениями молекулярных связей из-за появления в масле продуктов старения, при увеличении пробега автомобиля до 8700 км наблюдается уменьшение вязкости, которое максимально составило 25%, после чего она вновь увеличивается. Увеличение вязкости наступает после изгиба зависимости  $K_\mu = f(s)$ , т. е. при образовании нерастворимых продуктов старения, установление оптимальной концентрации которых позволяет обосновать ресурс моторного масла.

Зависимость  $K_\mu = f(s)$  характеризует изменение пусковых свойств моторного масла в холодный период эксплуатации двигателя и может служить диагностическим параметром для сравнения различных масел. В данном случае масло характеризуется хорошими пусковыми свойствами.

Влияние продуктов старения на вязкость и противоизносные свойства работающего масла представлены зависимостями коэффициента относительной вязкости  $K_\mu$  и диаметра пятна износа от коэффициента поглощения светового потока (рис. 2). Показано (рис. 2, а), что тенденция изменения коэффициента относительной вязкости  $K_\mu$ , аналогична зависимости  $K_n = f(s)$ . При значениях  $K_n$  от 0 до 0,057 ед. коэффициент  $K_\mu$  увеличивается, а при значениях  $K_n$  от 0,057 до 0,19 ед. он уменьшается, при значениях  $K_n > 0,19$  ед. он возрастает из-за увеличения концентрации нераствор-

имых продуктов старения.

Противоизносные свойства работавшего масла (рис. 2 б) при значениях  $K_n$  от 0 до 0,057 ед. снижаются по сравнению с товарным маслом в 1,59 раза (точка на ординате); при увеличении коэффициента  $K_n$  от 0,057 до 0,26 ед. они повышаются, а при значении  $K_n > 0,26$  ед. практически соответствуют товарному маслу.

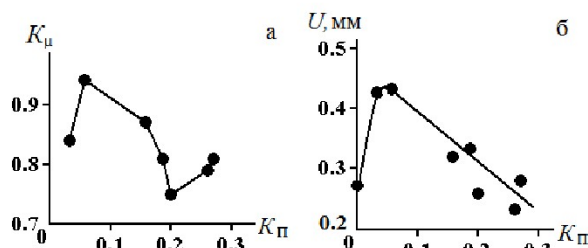


Рис. 2. Зависимость коэффициента относительной вязкости  $K_\mu$  (а) и диаметра пятна износа (б) от коэффициента поглощения светового потока при испытании работавшего моторного масла Ravenol VSI 5W-40 SM/CL

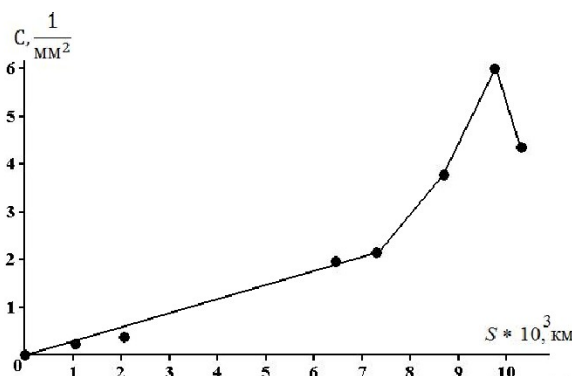


Рис. 3. Изменение концентрации продуктов старения  $C$  работавшего моторного на площади фрикционного контакта от пробега автомобиля

Такое изменение противоизносных свойств работавшего масла объясняется механохимическими процессами, протекающими на фрикционном контакте, интенсивность которых зависит от концентрации и состава продуктов старения (рис. 3) определяемых отношением:

$$C = K_{\Pi}/S_U \quad (4)$$

где  $S_U$  - площадь фрикционного контакта.

Согласно данных (рис. 3) концентрация продуктов старения  $C$  моторного масла на фрикционном контакте при увеличении пробега до 9742 км возрастает. Дальнейшее увеличение пробега (ресурса) вызывает уменьшение концентрации продуктов старения  $C$  за счёт увеличения площади контакта.

Результаты исследования механохимических процессов представлены диаграммами записи тока в зависимости от пробега автомобиля (рис. 4.) и размещены в порядке возрастания коэффициента поглощения светового потока. Из диаграмм следует, что при трении шара с цилиндром можно выделить три характерных участка.

Первый участок, при котором ток максимальный (100 мкА), определяет пластическую деформацию, при этом происходит металлический контакт микронеровностей поверхностей. Продолжительность этого участка зависит от противоизносных свойств работающего масла, пробега автомобиля и значений коэффициента поглощения светового потока. Показано, что чем большее значе-

ния химических соединений и об интенсивности упругих деформаций  $t_y$ , продолжительность которых определяют:

$$t_y = t \cdot K_{\Sigma} \quad (5)$$

где  $t$  – продолжительность упругих деформаций определяемых по диаграмме записи тока, мин;  $K_{\Sigma}$  - коэффициент электропроводности фрикционного контакта, определяемый как среднеарифметическое значение тока на различных участках упругих деформаций.

$$K_{\Sigma} = I_{\text{фк}}/I_3 \quad (6)$$

где  $I_{\text{фк}}$  – ток, протекающий через фрикционный контакт, мкА;  $I_3$  – заданная величина тока (100 мкА) при статическом положении испытуемых образцов

Результаты расчёта продолжительности пластической и упругопластической деформации  $t_{\text{уп}}$ , упругой деформации  $t_y$  и суммарной деформации  $\sum t_d$  приведены в табл. 1.

При трении происходит электризация поверхностей трения, влияющая на формирование абсорбционных и химически модифицированных слоёв на поверхностях, которая влияет на пара-

Таблица 1 - Результаты испытания работавшего синтетического моторного масла Ravenol 5W-40 SM/CF

Пробег, км	$K_{\Pi}$	$K_{\mu}$	$t_{\text{уп}}$	$t_y$	$\sum t_d$	$U$ , мм	$K_3$	$K_{\Pi}/U$	$S_U$	$K_{\Pi}/S_U$
исх.	0	1	17,5	98,8	25,4	0,273	0,08	0	0,059	0
1046	0,033	0,84	6,6	108,3	28,3	0,427	0,2	0,08	0,143	0,23
2057	0,057	0,94	7,5	106,3	34,1	0,433	0,25	0,13	0,147	0,38
6446	0,157	0,87	11,9	101,3	50,1	0,32	0,38	0,49	0,08	1,96
7296	0,187	0,81	6,9	107,6	45,6	0,333	0,40	0,56	0,087	2,14
8693	0,2	0,75	5,0	111,2	64,2	0,26	0,52	0,76	0,053	3,77
9742	0,26	0,79	5,0	110,6	68,0	0,233	0,57	1,12	0,043	6,0
10292	0,27	0,81	5,0	110,7	71,0	0,28	0,6	0,96	0,062	4,35

ние имеет коэффициента  $K_{\Pi}$ , тем меньше продолжительность данного участка.

Второй участок характеризуется уменьшением тока, протекающего через фрикционный контакт, до стабилизации, определённого значения тока. В этот период протекают упругопластические деформации, в результате которых на поверхностях трения образуются химические соединения металла с органическими кислотами масла. Этот участок наблюдается для масел, коэффициент  $K_{\Pi}$  у которых не превышает значений 0,187 ед. (рис. 4 диаграммы 1-5).

Третий участок характеризуется стабилизацией тока, протекающего через фрикционный контакт на некотором значении, причём с различной амплитудой его колебания. В данный период протекают процессы формирования и разрушения химических соединений на поверхности трения.

По амплитудам колебания тока можно судить о прочности образующихся на поверхности тре-

метр износа. Для исследования влияния полярности тока на противоизносные свойства проводились испытания работавших масел при положительном и отрицательном потенциалах на шарах (рис. 5). Показано, что износ при отрицательном потенциале на шарах больше (рис.5), кривая 2 при увеличении коэффициента  $K_{\Pi}$ . Наибольшие различия наблюдаются при пробеге автомобиля от 1000 до 2000 км при значениях коэффициента  $K_{\Pi} > 0,05$  ед., однако противоизносные свойства незначительно зависят от полярности тока при пробеге от 6000 до 10000 км и значениях  $K_{\Pi}$  от 0,18 до 0,26 ед.

Так, можно предположить, что при этом образуются либо неполярные продукты старения моторного масла, либо отсутствуют компоненты присадок. Однако при  $K_{\Pi} > 0,27$  ед. противоизносные свойства снижаются из-за увеличения концентрации нерастворимых продуктов старения,

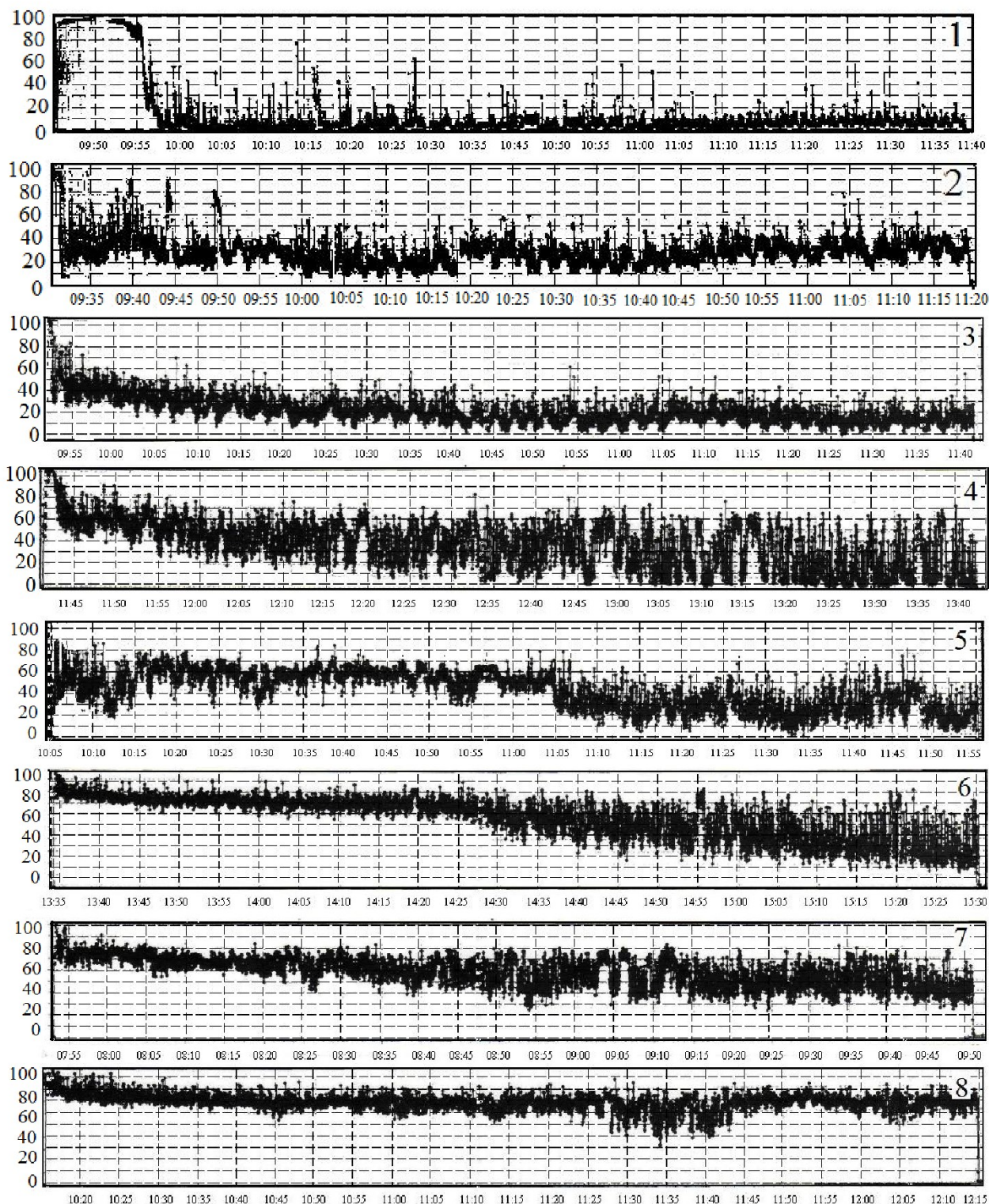


Рис. 4. Диаграммы записи тока при испытании на трёхшариковой машине трения синтетического масла Ravenol VSI 5W-40 SM/CL в зависимости от пробега автомобиля

что подтверждается величиной тока (70 мкА) на диаграмме 8 (рис. 4).

Влияние электрического потенциала на противоположные свойства работавшего масла можно объяснить изменениями интенсивности хемосорбционных процессов на поверхностях трения. Известно, что при трении поверхности трения

поляризуются, поэтому если напряжения от внешнего источника питания, совпадают, с поляризацией пар трения то интенсивность хемосорбционных процессов усиливается и это вызывает повышение противоположных свойств. В том случае, если напряжение поляризации не совпадает с напряжением от внешнего источника,

противоизносные свойства понижаются. Изменение противоизносных свойств работавших масел можно объяснить также влиянием напряжения от внешнего источника питания на поверхностную энергию твёрдого тела, влияющую на интенсивность хемосорбционных процессов

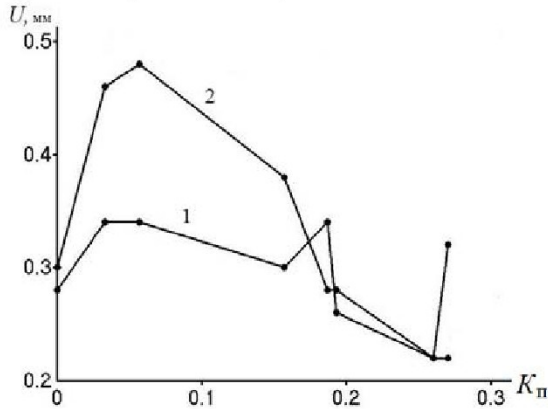


Рис. 5. Зависимость диаметра пятна износа от коэффициента поглощения светового потока и полярности тока, пропускаемого через фрикционный контакт при испытании работавшего синтетического моторного масла Ravenol 5 W-40 SM/CL: 1 – положительный потенциал на шаре; 2 – отрицательный потенциал на шаре;

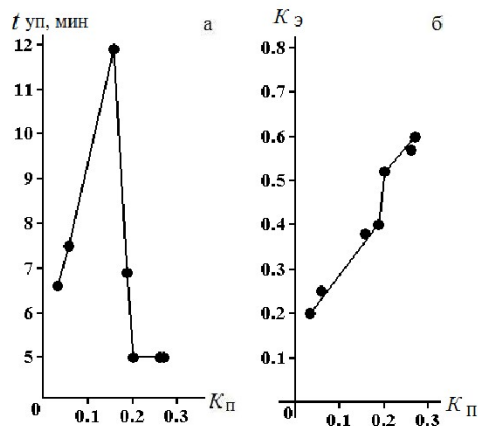


Рис. 6. Зависимость суммарной продолжительности пластической и упругопластической деформаций (а) и коэффициента электропроводности (б) от коэффициента поглощения светового потока, при испытании работавшего синтетического моторного масла Ravenol 5W-40 SM/CL

Исследованием влияния продуктов старения на продолжительность пластической и упругопластической деформации  $t_{уп}$  (рис. 6, а, таблица) установлено, что наибольшая она у товарного масла – 17,5 мин. При значениях  $K_p < 0,05$  ед., продолжительность этих деформаций падает до 6,6 мин., а при увеличении  $K_p$  до 0,157 ед. она увеличивается, а затем падает, при  $K_p > 0,193$  ед.,

стабилизируется.

Необходимо отметить, что стабилизация продолжительности пластической и упругопластической деформации наступает при изгибе зависимости  $K_p = f(s)$  (рис. 1, а), а уменьшение продолжительности этих деформаций при изменении коэффициента  $K_p$  в диапазоне от 0,157 до 0,193 ед. при начале образования нерастворимых продуктов старения (рис. 1, а). Поэтому продукты старения и их состав оказывают существенное влияние на продолжительность пластической и упругопластической деформации.

Исследованиями влияния продуктов старения работавшего масла на электропроводность фрикционного контакта установлено (рис. 6, б), что с увеличением коэффициента  $K_p$  коэффициент электропроводности  $K_э$  имеет тенденцию увеличения, причём при начале образования нерастворимых продуктов старения наблюдается скачкообразное увеличение коэффициента  $K_э$ . Это может объясняться электропроводностью нерастворимых продуктов окисления.

Связь между параметром износа, коэффициентом электропроводности  $K_э$  и суммарной продолжительностью пластической, упругопластической и упругой деформациями  $t_d$  представлена на рис. 7. Установлено, что с увеличением коэффициента электропроводности до 0,2 ед. (рис. 7, а) параметр износа увеличивается, от 0,2 до 0,34 ед. стабилизируется, а при значениях  $K_э$  от 0,34 до 0,57 ед. износ уменьшается, а при значении  $K_э > 0,57$  ед. износ повторно увеличивается за счёт увеличения концентрации нерастворимых продуктов окисления.

Связь параметра износа с продолжительностью суммарной деформации представлена зависимостью на (рис. 7, б). Для товарного масла продолжительность суммарной деформации составила 17,5 мин, а износ 0,27 мм, тогда как для работающих масел (сплошная линия) наблюдается уменьшение износа при увеличении продолжительности суммарной деформации, а при  $t_d > 70$  мин. износ увеличивается за счёт изменения вида изнашивания, т. е. замены окислительного изнашивания на абразивный, это объясняется наличием в работавшем масле нерастворимых продуктов старения, действующих как абразивные частицы.

На основании проведённых исследований и анализа литературных данных [5] предложен критерий оценки противоизносных свойств работающих масел, определяемый отношением коэффициента поглощения светового потока к параметру износа, характеризующий условную концентрацию продуктов старения на площади фрикционного контакта (рис.8).

Установлено, что до значения коэффициента  $K_p = 0,19$  ед., наблюдается линейная зависимость критерия  $K_p/U$  от коэффициента  $K_p$ , а при  $K_p >$

0,19 ед., изгиб зависимости вызван повышением противоизносных свойств за счёт уменьшения параметра износа. Данная зависимость  $K_{\Pi}/U = f(K_{\Pi})$  может служить эталоном для исследуемого масла и применяться для определения параметра износа при его старении в двигателе внутреннего сгорания для этого необходимо отработать пробу масла и определить коэффициент поглощения светового потока. По зависимости определить

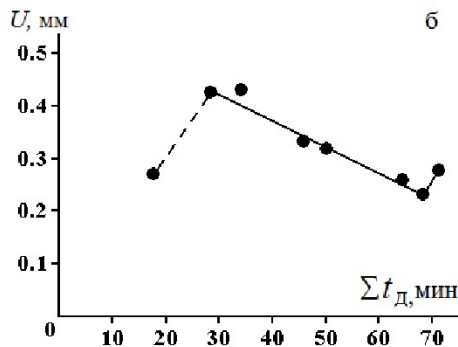
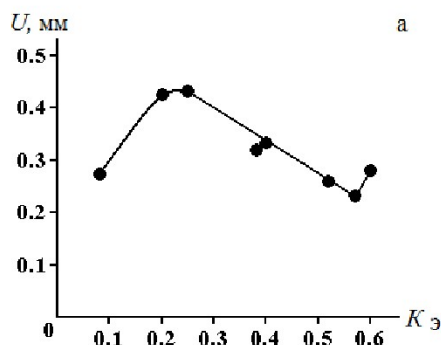


Рис. 7. Зависимость диаметра пятна износа от коэффициента электропроводности фрикционного контакта  $K_{\varepsilon}$  (а) и продолжительности суммарной деформации  $t_{\delta}$  (б)

показатель  $K_{\Pi}/U$ , а по показателю параметр износа. Например, показатель  $K_{\Pi}/U = 0,9$  ед., а  $K_{\Pi} = 0,2$  ед., параметр износа равен  $U = 0,2 / 0,9 = 0,22$  мм.

На основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. Применение комплексного метода контроля работающих масел включающего фотометрию, измерение вязкости, определение противоизносных свойств и механохимических процессов, протекающих на фрикционном контакте, позволяет измерять текущие значения состояния моторного масла и корректировать их ресурс.

2. Установлено что, процесс старения синтетического моторного масла описывается линейным уравнением и характеризуется образованием двух видов продуктов различной оптической плотности, причём нерастворимые продукты вызывают изгиб зависимости коэффициента погло-

щения светового потока от пробега автомобиля. Вязкость исследуемого масла при пробеге 8693 уменьшилось на 25 %. При снижении вязкости работающего масла на 20% масло необходимо заменить, так как увеличиваются потери на трение.

3. Показано, что начальные продукты старения уменьшают вязкость, а нерастворимые её увеличивают, однако противоизносные свойства работающего масел повышаются в течение всего ус-

тановленного нормативного ресурса.

4. Установлено, что полярность тока, пропускаемого через фрикционный контакт, влияет на противоизносные свойства синтетического моторного масла Ravenol 5W - 40 SM/CL до 7000 км пробега или значения коэффициента поглощения светового потока равного 0,15 ед., кроме того при определённой концентрации нерастворимых продуктов старения масла наблюдается скачкообразное увеличение коэффициента электропроводности фрикционного контакта, вызывающего снижение противоизносных свойств.

5. Установлено что при продолжительности суммарной деформации на фрикционном контакте, более 70 мин. противоизносные свойства понижаются за счёт увеличения концентрации нерастворимых продуктов старения масла.

6. Сроки замены моторных масел по пробегу или наработке рекомендуемые заводом изготови-

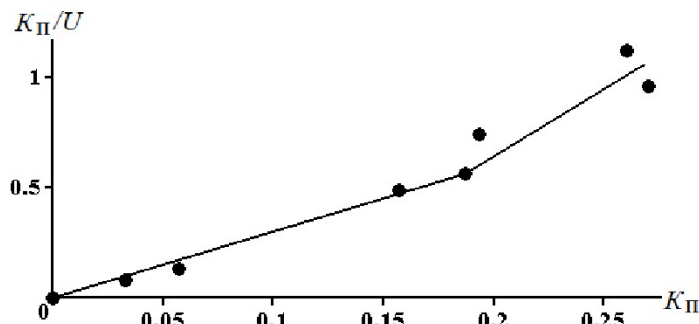


Рис. 8. Зависимость критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока

телем не всегда достаточно обоснованы. Основные физико-химические показатели качества масла не всегда достигают предельных значений. В качестве показателей изменения свойств работавшего синтетического моторного масла можно использовать коэффициент поглощения светового потока  $K_p$ , коэффициент относительной вязкости

$K_\mu$ , коэффициент электропроводности  $K_e$  и противозносные свойства.

7. Критерий противозносных свойств, характеризующий условную концентрацию продуктов старения на площадь фрикционного контакта рекомендуется для прогнозирования параметра износа работающих моторных масел.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авт. свид. СССР № 983522. Устройство для испытания материалов и масел / Б. И. Ковальский, М.Е. Грибанов, –1982, Бюл. №17.
2. Авт. свид. СССР №1054732. Способ определения смазывающей способности масел / Б. И. Ковальский, Г.М. Сорокин, А.П. Ефремов –1982, Бюл. № 42
3. *Ковальский Б. И.* Методы и средства повышения эффективности использования смазочных материалов / Б. И.Ковальский. – Новосибирск: Наука, 2005.
4. *Безбородов Ю. Н.* Методы и средства повышения эффективности использования трансмиссионных масел / Ю. Н. Безбородов – Красноярск: Сиб. федер. ун-т; Политехн. ин-т, 2007. – 154 с.
5. Авт. свид. СССР № 1270642. Способ оценки вида изнашивания поверхностей трения / Б. И. Ковальский, Г.М. Сорокин –1986, Бюл. №17.

□ Авторы статьи

Верещагин  
Валерий Иванович,  
аспирант каф. «Топливо-  
обеспечение и горючесмазочные  
материалы» (Институт нефти и газа  
«Сибирский федеральный универси-  
тет». г. Красноярск ).  
E-mail: [valeri-2502@mail.ru](mailto:valeri-2502@mail.ru).

Ковальский  
Болеслав Иванович,  
докт.техн.наук, проф.каф. «Топли-  
вообеспечение и горючесмазочные  
материалы» «Топливообеспечение и  
горючесмазочные материалы» (Ин-  
ститут нефти и газа «Сибирский  
федеральный университет». г. Крас-  
ноярск ).  
Тел. 8(3912)747237

Рунда  
Михаил Михайлович,  
начальник учебного отдела Учебно-  
го военного центра, соискатель каф.  
«Топливообеспечение и горючесма-  
зочные материалы» (Институт неф-  
ти и газа «Сибирский федеральный  
университет». г. Красноярск ).  
Тел сот. 89233517355

Шрам  
Вячеслав Геннадьевич.,  
аспирант каф. «Топливообеспечение  
и горючесмазочные материалы»  
(Институт нефти и газа «Сибир-  
ский федеральный университет». г.  
Красноярск ).  
E-mail: [shram18rus@mail.ru](mailto:shram18rus@mail.ru)

Берко  
Александр Валентинович  
генеральный директор ООО «Эко-  
продукт», соискатель каф. «Топли-  
вообеспечение и горючесмазочные  
материалы» (Институт нефти и газа  
«Сибирский федеральный универси-  
тет». г. Красноярск ).  
E-mail: [BerkoA@rambler.ru](mailto:BerkoA@rambler.ru)