

ФОРМИРОВАНИЕ ЯДРА И КОНЦЕНТРИЧЕСКИХ ЗОН ПРИ ОЦЕНКЕ МОЮЩЕ-ДИСПЕРГИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МОТОРНОГО МАСЛА

В.К. Корнеева, канд. техн. наук, доцент
В.М. Капцевич, д-р техн. наук, профессор
И.В. Закревский, ст. преподаватель
В.В. Остриков, студент

Белорусский государственный аграрный технический университет

Аннотация. Описан процесс формирования ядра и концентрических зон на хроматограмме, полученной методом «капельной пробы». Подтверждено наличие трех характерных стадий растекания капли и фильтрования масла.

Ключевые слова: моторное масло, «капельная проба», ядро, концентрические зоны, глубинное и поверхностное фильтрование, стадии растекания и фильтрования.

В настоящее время одновременно с ростом энергонасыщенности отраслей АПК возникает острая необходимость не только контроля качества используемых новых моторных масел, но отслеживания изменения свойств работающих масел непосредственно в процессе эксплуатации сельскохозяйственной техники. В моторном масле в процессе эксплуатации непрерывно происходят как количественные, так и качественные изменения – масло «стареет». Старение масла обусловлено тесно взаимосвязанными между собой термическими, физико-химическими и трибологическими процессами, протекающими в масляной системе ДВС. Под действием этих процессов старение моторного масла происходит в результате его загрязнения пылью, продуктами износа, водой или охлаждающей жидкостью, топливом, продуктами разложения самого масла и срабатывания присадок.

Одним из наиболее распространенных и простых методов оценки состояния работающего моторного масла является метод «капельной пробы» – метод *Blotter Spot*, заключающийся в нанесении капли масла на фильтровальную бумагу и последующем анализе полученного масляного пятна [1]. Метод «капельной пробы» является наиболее информативным органолептическим методом, позволяющим по бумажной хроматограмме масляного пятна выделить кольцевые зоны и оценить моюще-диспергирующие свойства, наличие воды и топлива, а также загрязненность моторного масла нерастворимыми примесями. Метод позволяет определить критическое состояние моторного масла, а именно, потерю моюще-диспергирующих свойств, предельно допустимое содержание воды, топлива и нерастворимых примесей, что в конечном итоге дает возможность сделать заключение о целесообразности дальнейшего использования масла.

В работах [2–5] приведены методики осуществления метода «капельной пробы» с различными режимами процесса. Так, автор [2] предлагает наносить каплю масла при температуре 20–25 °С с помощью пипетки офтальмологической, заполненной на 1/2 стеклянной части, на фильтровальную бумагу обеззольный фильтр «синяя лента» с последующей сушкой масляного пятна при комнатной температуре (20–25 °С) в течении 3–4 ч. В работе [3] описан метод «капельной пробы» с нанесением капли масла при помощи стержня с высоты 5–10 мм и высушиванием масляного пятна в течении 10 минут при комнатной температуре, а исследователь [4] обосновывает выбор высоты падения капли с расстояния 50 мм и температуры нанесения капли, равной 80 °С, в тоже время автор [5] предлагает осуществлять сушку при температуре 160 ± 10 °С.

Таким образом, отсутствие единого мнения в подходах к реализации метода «капельной пробы» приводит к невозможности сопоставления и оценки результатов различных авторов. Кроме того, при проведении анализа полученных хроматограмм, в том числе с использованием компьютерных технологий, данные о процессе формирования

кольцевых зон, связанном с поведением капли масла на фильтровальной бумаге, динамике ее растекания и впитывания, в литературе отсутствуют.

Цель работы. Описать процесс формирования ядра и концентрических зон на хроматограмме, полученной методом «капельной пробы», подтвердить наличие трех характерных стадий растекания капли и фильтрования масла.

Стандарт ASTM D7899-19 [1], разработанный Американским обществом по испытанию материалов (*American Society for Testing and Materials*) и описывающий процедуру определения моюще-диспергирующих свойств и загрязненности моторных масел, с нашей точки зрения, более реально описывает распределение различных зон на хроматограмме масляного пятна (рис. 1).

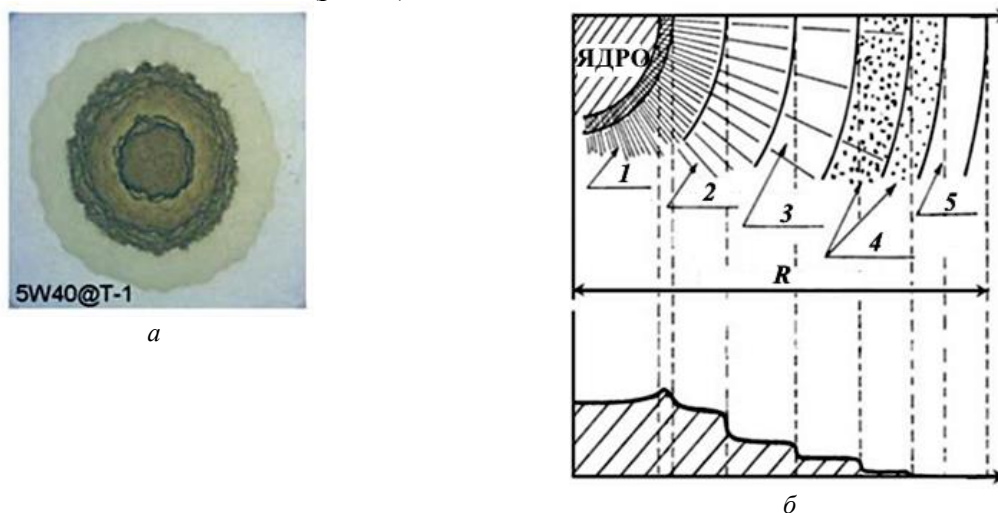


Рисунок 1. Капельная проба: *a* – хроматограмма полученного масляного пятна; *б* – схема распределения различных зон; 1 – зона частиц среднего размера; 2 – зона частиц мелкого размера; 3 – зона ультрадисперсных частиц; 4 – зона продуктов окисления; 5 – зона чистого масла и топлива; *R* – радиус масляного пятна после сушки при 80 °С в течение 1 ч

Капля масла после попадания на фильтровальную бумагу, во-первых, растекается под действием силы тяжести по ее поверхности и проникает в поры в вертикальном направлении, и, во-вторых, под действием капиллярных сил распространяется по порам бумаги в радиальном направлении. Процесс перемещения масла, с содержащимися в нем частицами загрязнений, по порам бумаги является процессом фильтрования. При этом, процесс протекания фильтрования в вертикальном и радиальном направлении реализуется по-разному. В вертикальном направлении процесс осуществляется в режиме поверхностного фильтрования, при котором крупные частицы загрязнений, а также гелеобразные образования, размеры которых превышают размеры поверхностных пор бумаги, не могут проникнуть в них и осаждаются на поверхности с образованием кейк-слоя [6] – формируется ядро масляного пятна. Средние и мелкие частицы загрязнений, способные проникнуть в поровые каналы в вертикальном направлении, в дальнейшем с потоком масла перемещаются в радиальном направлении. Такие частицы, перемещаясь по порам в радиальном направлении, задерживаются в них в зависимости от размеров в определенных концентрических зонах. Таким образом на хроматограмме образуются: зона частиц среднего размера (рис. 1, зона 1), зона частиц мелкого размера (рис. 1, зона 2) и зона ультрадисперсных частиц (рис. 1, зона 3). Зона продуктов окисления (рис. 1, зона 4) и расположенная за ней зона чистого масла и топлива (рис. 1, зона 5) формируются на хроматограмме в зависимости от различия капиллярных свойств продуктов окисления, масла и топлива.

Рассмотрим процесс формирования ядра масляного пятна в начальный момент растекания и проникновения в поры капли работающего моторного масла марки 10W40 (30 ч

наработки) на фильтровальной бумаге «синяя лента» (размер пор 3–5 мкм, толщина 0,16 мм, пористость 0,78–0,8).






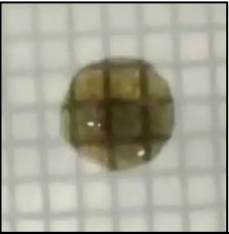

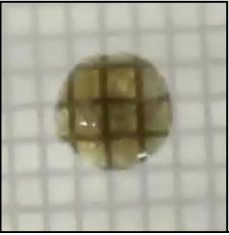


Для нанесения капли масла на фильтровальную бумагу собиралась установка, состоящая из капельницы 1, закрепленной вертикально на штативе 2, с возможностью регулирования объема и высоты падения капли. Объем капли выбирался равным 15 мкл, высота падения – 25 мм.


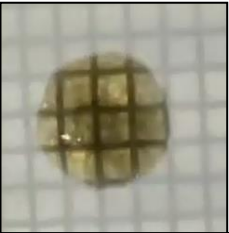
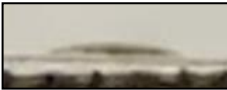
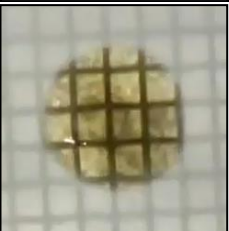
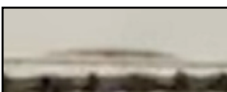
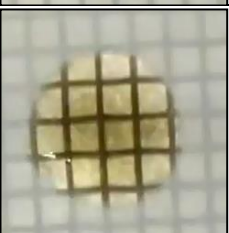
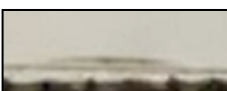
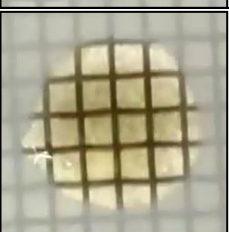
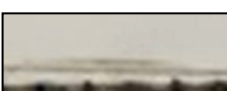
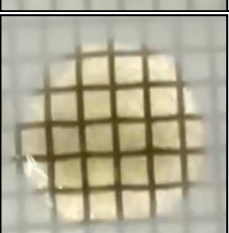
В процессе проведения эксперимента при помощи камеры мобильного телефона фиксировалось видеоизображение поведения капли (вид сбоку и вид сверху) с момента нанесения ее на фильтровальную бумагу и в процессе последующего растекания и проникновения в течение 100 с через 1 с.

Примеры результата проведения исследований динамики изменения формы и размеров (диаметр основания D_k , высота капли h , диаметр масляного пятна $D_{п.}$) капль при растекании на фильтровальной бумаге приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение формы и размеров капель

Время, τ, с	Внешний вид и размеры капли и масляного пятна				
	Вид сбоку	Вид сверху	D_k , мм	h , мм	$D_{п.}$, мм
0			3,77	1,38	4,00
1			4,45	1,15	5,20
2			5,41	0,71	6,08
3			5,41	0,66	6,60
4			5,41	0,59	7,32

Время, τ , с	Внешний вид и размеры капли и масляного пятна				
	Вид сбоку	Вид сверху	D_k , мм	h , мм	$D_{п}$, мм
5			5,41	0,52	7,32
10			5,41	0,42	8,30
20			5,35	0,21	9,26
50			4,71	0,12	10,21
100			3,91	0,1	11,51

Процесс растекания капли и фильтрования масла на фильтровальной бумаге носит сложный характер и протекает в три стадии [7–9].

На первой стадии после попадания капли масла на бумагу происходит ее растекание по поверхности с увеличением диаметра основания и уменьшением высоты капли. Одновременно происходит фильтрование масла в вертикальном направлении до момента полного заполнения пор по толщине бумаги. Крупные частицы загрязнений и гелеобразные частицы, содержащиеся в масле, в виде кейк-слоя оседают на поверхности бумаги (происходит формирование ядра), а более мелкие частицы – проникают в поры.

На второй стадии продолжается уменьшение высоты капли, а ее диаметр основания остается постоянным. При этом фильтрование масла с частицами загрязнений осуществляется в радиальном направлении.

Начало третьей стадии можно охарактеризовать полным исчезновением капли, а дальнейшее фильтрование масла с частицами загрязнений продолжается в радиальном направлении. На второй и третьей стадиях происходит последовательное формирование в виде концентрических окружностей сначала зоны частиц среднего размера, и последующих зоны частиц мелкого размера, зоны ультрадисперсных частиц, зоны продуктов окисления и зоны чистого масла и топлива.

Рис. 2 наглядно иллюстрирует присутствие трех стадий процесса растекания капли и фильтрования масла на фильтровальной бумаге. Анализ полученных результатов показывает, что первая стадия, то есть формирование ядра, происходит на 2 с процесса.

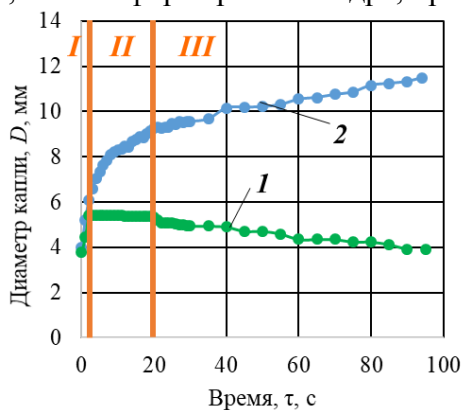


Рисунок 2. Зависимость изменения диаметра основания капли (1) и масляного пятна (2) от времени τ

Вторая стадия, сопровождающаяся постоянством диаметра капли и возрастанием диаметра масляного пятна, длится с 2 по 20 с.

На третьей стадии процесс фильтрования в радиальном направлении продолжается с линейным уменьшением диаметра капли и дальнейшим увеличением диаметра масляного пятна.

Процесс растекания капли и фильтрования масла, одновременно с изменением формы и размеров капли, сопровождается и изменением краевого угла смачивания масла на фильтровальной бумаге. Краевой угол смачивания θ , рассчитывали, с учетом предположения [10], что жидкая капля является частью сферы (рис. 3).

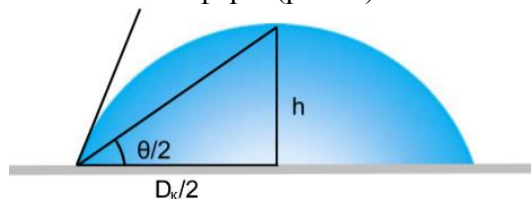


Рисунок 3. Приближенная оценка краевого угла смачивания

Тогда краевой угол смачивания можно рассчитать:

$$\theta = 2 \arccos \frac{D_k / 2}{\sqrt{(D_k / 2)^2 + h^2}} \frac{180}{\pi}.$$

На рис. 4 представлены результаты расчетов изменения краевого угла смачивания θ от времени τ.

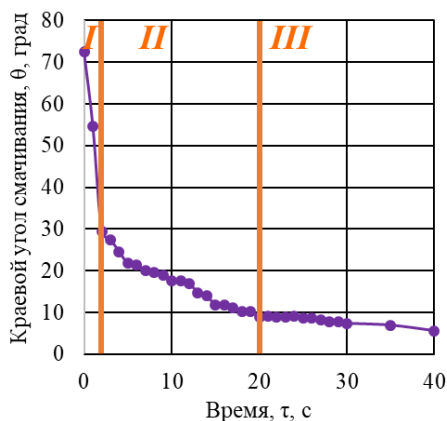


Рисунок 4. Зависимость изменения краевого угла смачивания θ от времени τ

Полученная графическая зависимость (рис. 4) также свидетельствует о наличии трех зон растекания капли и фильтрации масла на фильтровальной бумаге: на первой стадии угол смачивания резко уменьшается, на второй – его изменение характеризуется линейной зависимостью, а на третьей – угол смачивания остается практически постоянным.

Выводы. Описан процесс формирования ядра и концентрических зон на хроматограмме, полученной методом «капельной пробы». Показано, что формирование ядра, происходит на 2 с процесса в результате поверхностного фильтрации с образованием кейк-слоя, а формирование концентрических зон осуществляется за счет глубинного фильтрации в радиальном направлении движения масла с частицами загрязнений.

Подтверждено наличие трех характерных стадий растекания капли и фильтрации масла, заключающихся в заполнении маслом пор бумаги в вертикальном направлении и осаждением на ее поверхности крупных и гелеобразных частиц загрязнений (первая стадия), дальнейшее перемещение масла с загрязнениями под действием капиллярных сил в радиальном направлении и формировании концентрических зон на хроматограмме масляного пятна (вторая и третья стадии).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Standard Test Method for Measuring the Merit of Dispersancy of In-Service Engine Oils with Blotter Spot Method: ASTM D7899-19. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. – 7 p.
2. Серков, А.П. Совершенствование обслуживания автотранспортных средств за счет диагностики технического состояния эксплуатационных материалов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / А.П. Серков. – Омск, 2018. – 189 л.
3. Остриков, В.В. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости / В.В. Остриков [и др.]. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 304 с.
4. Розбах, О.В. Экспресс-диагностика качества высокощелочных моторных масел способом «капельной пробы»: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / О.В. Розбах. – Омск, 2006. – 137 л.
5. Гурьянов, Ю.А. Экспресс-методы и средства диагностирования агрегатов машин по параметрам масла: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / Ю.А. Гурьянов. – Челябинск, 2007. – 371 л.
6. Леонов, А. Н. Комбинированные фильтрующие системы на основе фильтров с поверхностным и объемным механизмами фильтрации / А.Н. Леонов, В.М. Капцевич, В.К. Корнеева. – Минск: БГАТУ, 2017. – 124 с.
7. Starov, V.M. Spreading of liquid drops over porous substrates / V.M. Starov et al. // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2003. – № 104. – P. 123-158.
8. Rosenholm, J.B. Liquid spreading on solid surfaces and penetration into porous matrices: Coated and uncoated papers / J.B. Rosenholm // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2015. – № 220. – P. 8-53.
9. Chebbi, R. Absorption and spreading of a liquid droplet over a thick porous substrate / R. Chebbi // *ACS Omega*. – 2021. – №6. – P. 4649-4655.
10. Yuan, Y. Contact Angle and Wetting Properties / Y. Yuan, T.R. Lee // *Springer Series in Surface Sciences book series (SSSUR, volume 51)*. – 2013. –P. 3-34.