

8. Научные основы повышения плодородия почв, селекции и технологий производства продукции растениеводства в адаптивно-ландшафтных системах земледелия ЦЧР/Кадыров С.В. [и др.] // Воронеж, 2023.

9. Дедов А.В., Несмеянова М.А. Влияние технологии возделывания озимой пшеницы на показатели плодородия чернозема типичного и продуктивность звеньев севооборотов / Дедов А.В., Несмеянова М.А. // Нива Поволжья. 2018, № 2 (47). - С. 50-56.

10. Чернышов А.В., Коржов С.И., Яковлева М.Е. Особенности применения посевных комплексов и машин для внесения удобрений в органическом земледелии / А.В. Чернышов, С.И. Коржов, М.Е. Яковлева // В сборнике: Тенденции развития технических средств и технологий в АПК. Материалы международной научно-практической конференции. - Воронеж, 2025. - С. 238-242.

11. Солнцев В.Н., Оробинский В.И., Чернышов А.В. Механизация растениеводства / В.Н. Солнцев, В.И. Оробинский, А.В. Чернышов // Практикум.- Воронеж, 2016.

12. Milyutkin V.A., Vuxmann V., Mozgovoy A.V., Rudoj D.V., Olshevskaya A.V. Modern technology for cultivation of agricultural crops in zones of "risk farming" with conservation and accumulation of atmospheric moisture. В сборнике: XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Volume 1. Springer Verlag, 2022. - С. 138-146.

---

© Милюткин В.А., Макушин А.Н., Блинова О.А., Праздничкова Н.В., 2025

УДК 621.432

**Корнеева Валерия Константиновна**

Белорусский государственный аграрный технический университет, доцент, к.т.н, доцент, Республика Беларусь, Минск, e-mail: lerakor1974@mail.ru

**Капцевич Вячеслав Михайлович**

Белорусский государственный аграрный технический университет, зав. кафедрой, д.т.н, профессор, Республика Беларусь, Минск, e-mail: slavakar47@mail.ru

## **ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО ПЯТНА ПРИ РАСТЕКАНИИ КАПЛИ МОТОРНОГО МАСЛА ПО ФИЛЬТРОВАЛЬНОЙ БУМАГЕ**

*Аннотация.* Предложена физическая модель, описывающая процесс формирования сложной структуры масляного пятна при растекании капли работающего моторного масла по пористой поверхности. Мо-

дель основана на двухстадийном подходе, разделяющем процесс на поверхностное фильтрование, формирующее ядро и его кольцевую зону, и последующее глубинное радиальное фильтрование, ответственное за образование диффузионной зоны и зоны чистого масла. Модель связывает наблюдаемые макроскопические характеристики пятна с фундаментальными механизмами гидродинамики, теории фильтрации и физико-химии термической деструкции масла.

*Ключевые слова:* моторное масло, капельная проба, зоны масляного пятна, физическая модель.

**Korneeva Valeria Konstantinovna**

Belarusian State Agrarian Technical University, Associate Professor, PhD, Associate Professor, Republic of Belarus, Minsk, e-mail: lerakor1974@mail.ru

**Kaptsevich Vyacheslav Mikhailovich**

Belarusian State Agrarian Technical University, Head of Department, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Republic of Belarus, Minsk, e-mail: slavakap47@mail.ru

**PHYSICAL MODEL OF FORMATION OF A  
CHROMATOGRAPHIC STAIN WHEN A DROP OF MOTOR OIL  
SPREADS OVER FILTER PAPER**

*Abstract.* A physical model is proposed that describes the process of formation of a complex structure of an oil stain when a drop of working motor oil spreads over a porous surface. The model is based on a two-stage approach dividing the process into surface filtration, forming the core and its annular zone, and subsequent deep radial filtration responsible for the formation of the diffusion zone and the zone of pure oil. The model links the observed macroscopic characteristics of the spot with the fundamental mechanisms of hydrodynamics, filtration theory and the physical chemistry of thermal destruction of oil.

*Keywords:* motor oil, drop test, oil spot zones, physical model.

Капельная проба является одним из наиболее доступных и информативных методов экспресс-диагностики состояния моторного масла [3, 4]. Ее уникальное преимущество заключается в том, что, в отличие от стандартных лабораторных методов анализа (спектрометрия, хроматография, ИК-спектроскопия), она не требует сложного оборудования и может быть выполнена в любых условиях эксплуатации техники. При этом визуальная структура сформированного пятна на фильтровальной бумаге несет важную информацию о физических и химических процессах, протекающих в смазочном материале.

Характерные зоны хроматографического пятна – ядро, его кольцевая зона, диффузионная зона и зона чистого масла (рис. 1) – представляют собой результат фильтрационного разделения продуктов деградации масла в пористой среде бумаги [1]. Их морфология и относительные размеры зависят от степени деградации масла, наличия механических примесей, сажи, шлама, продуктов термоокислительной деградации. Таким образом, метод позволяет получить интегральный «отпечаток состояния» масла, отражающий как физический износ смазочного материала, так и эффективность его работы в двигателе.

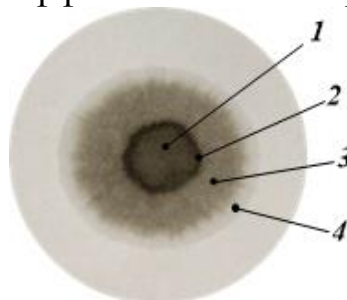


Рис. 1. Характерные зоны хроматографического масляного пятна:  
1 – ядро; 2 – кольцевая зона ядра; 3 – диффузионная зона; 4 – зона чистого масла

*Источник: составлено автором*

Несмотря на простоту реализации, метод капельной пробы имеет фундаментальную основу, тесно связанную с процессами фильтрации в пористых средах и гидродинамикой капиллярного растекания. Именно это обстоятельство делает его ценным не только как практический инструмент диагностики, но и как объект научного анализа. Разработка физической модели, описывающей закономерности формирования зон масляного пятна, позволяет в дальнейшем перейти от субъективной визуальной оценки к количественным критериям, которые могут быть стандартизированы и использованы в системах автоматизированного анализа.

Целью работы является разработка двухстадийной физической модели формирования зон хроматографического масляного пятна, основанной на поверхностном и глубинном механизмах фильтрования.

Опишем двухстадийную физическую модель, связывающую поверхностное фильтрование [2], определяющее формирование ядра и его краевой зоны, с процессами глубинного радиального фильтрования [2], ответственными за образование диффузионной зоны и зоны чистого масла. Такой подход позволяет дать целостное объяснение структуры капельного пятна и расширяет возможности метода капельной пробы как диагностического инструмента.

**Стадия I** происходит практически мгновенно в момент контакта капли с фильтровальной бумагой. На этой стадии формируется ядро и его четко очерченная граница – краевая зона ядра.

Процесс на этой стадии представляет собой растекание капли по поверхности бумаги в радиальном направлении с одновременным поверхностным фильтрованием в направлении, перпендикулярном ее плоскости. Основной движущей силой этого процесса является капиллярное давление, втягивающее жидкую фазу масла вглубь пор бумаги. В результате объем капли уменьшается по высоте, что одновременно сопровождается увеличением площади ее основания.

Поверхностный слой бумаги на этой стадии выступает в роли мембранного фильтра, осуществляя фракционное механическое разделение примесей и продуктов глубокой термоокислительной деструкции масла по их размеру и физическим свойствам.

Процесс на стадии поверхностного фильтрования протекает в два этапа:

1. *Формирование ядра.* Самые крупные и нерастворимые частицы загрязнений – сажа, частицы нагара, продукты износа, абразивные частицы, крупные сгустки окисленного масла и шлама – не могут проникнуть в поры и оседают на ее поверхности. Размер и плотность ядра свидетельствуют о степени загрязнения масла нерастворимыми примесями. Большое, черное и плотное ядро – признак сильно загрязненного масла.

2. *Образование краевой зоны ядра.* Поток базового масла продолжает растекаться по поверхности фильтровальной бумаги, просачиваясь сквозь ее волокна, и увлекает за собой более легкие, но уже достаточно крупные агломераты – частицы шлама, гели и скопления продуктов окисления. Эти частицы слишком велики, чтобы свободно двигаться вместе с чистым маслом вглубь бумажной матрицы (механизм глубинного фильтрования для них не работает), но достаточно малы, чтобы не остаться в самом центре капли. В определенный момент, когда несущая способность растекающегося потока масла ослабевает, а сопротивление волокон бумаги возрастает, эти липкие агломераты выпадают в осадок, формируя хорошо различимое кольцо вокруг ядра – его кольцевую зону. Таким образом, кольцевая зона – это зона осаждения продуктов химического старения масла (гелей и шламов), которые формируются при истощении моющих и диспергирующих присадок. Ее появление и четкость являются одним из главных критериев для выбраковки масла.

**Стадия II** описывает медленное растекание оставшейся жидкой фазы масла и формирование зоны диффузии и зоны чистого масла.

На этой стадии происходит процесс глубинного фильтрования в радиальном направлении.

Поток масла, уже очищенного от механических примесей, шлама и смол, движется от кольцевой зоны ядра к периферии под действием капиллярных сил. Мелкие дисперсные частицы (сажа и др.) постепенно задерживаются в объеме бумаги, формируя *диффузионную зону*, визуально воспринимаемую как серая область с плавным уменьшением интенсивности окраски в направлении к периферии. Жидкая фаза масла, очищенная от мелких частиц, формирует *внешнюю зону чистого масла*.

Таким образом, предложенная двухстадийная модель позволяет комплексно и с высокой степенью детализации описать процесс формирования хроматографического масляного пятна. Она успешно объясняет как мгновенное образование плотного ядра и его краевой зоны за счет поверхностного фильтрования и фракционирования продуктов деструкции, так и последующее, более медленное формирование диффузионной зоны в результате глубинного радиального фильтрования. Модель является основой для качественного анализа капельной пробы и более глубокого понимания состояния работающего моторного масла.

### Список литературы

1. Капцевич В.М. Экспресс-методы контроля свойств моторного масла автотракторных двигателей внутреннего сгорания в условиях организаций агропромышленного комплекса / В.М. Капцевич, С.К. Карпович, В.К. Корнеева, И.В. Закревский. – Минск: БГАТУ, 2023. – 120с.
2. Леонов А.Н. Комбинированные фильтрующие системы на основе фильтров с поверхностным и объемным механизмами фильтрования / А. Н. Леонов, В. М. Капцевич, В. К. Корнеева. – Минск: БГАТУ, 2017. – 124 с.
3. Химченко А.В. Предпосылки применения цифрового двойника для определения предельного состояния моторного масла или прогнозирования его остаточного ресурса / А.В. Химченко, В.И. Орбинский, В.В. Остриков, Е.А. Григорьев, Д.В. Юшко // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 148-160.
4. 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.