

УДК 543.429.23; 621.892

Дисперсионный анализ ферромагнитных частиц в отработанных моторных маслах

А.Д. Глушков, Н.Я. Синявский, Н.А. Кострикова

Калининградский государственный технический университет,
Советский проспект, д. 1, г. Калининград 236022, Россия

Поступила в редакцию 20.01.2025.

Изучение содержания ферромагнитных частиц износа в отработанном моторном масле позволяет судить о степени износа трущихся деталей двигателя. В данной работе описывается новый метод определения фракционного состава системы ферромагнитных частиц износа в отработанном моторном масле, основанный на кинетике седиментации частиц в поле силы тяжести и аппаратном времени поперечной релаксации ЯМР протонов углеводородов полидисперсной суспензии. В отличие от традиционного седиментационного анализа методом непрерывного взвешивания, в предлагаемом способе используется метод непрерывного измерения времени ЯМР релаксации T_2^* . Предполагается, что взвешенные частицы увеличивают неоднородность магнитного поля магнита релаксометра и аппаратное время спин-спиновой релаксации пропорционально массе осадка.

Получено аналитическое выражение распределения по размерам частиц и для наиболее вероятного эквивалентного радиуса для математической модели седиментационной кривой. Исследованы две физические модели частиц железа разных размеров, внесенных в свежие моторные масла. Показано, что при одной и той же концентрации железа в масле частицы мелких размеров делают магнитное поле более неоднородным, чем крупные частицы. Исследована кинетика изменения времён релаксации T_2^* в процессе седиментации. Установлено, что при седиментации ферромагнитных частиц, времена спин-решёточной T_1 и спин-спиновой T_2 релаксации остаются неизменными. Для получения распределения ферромагнитных частиц все необходимые преобразования массива данных $T_2^*(t)$ выполнялись численно. Показано, что в отличие от одномодальных распределений для модельных образцов свежих масел с частицами железа, отработанное 420 часов масло M-10G2CS даёт распределение в широкой полосе радиусов от 3 мкм до 11 мкм. Распределения радиусов частиц в маслах Shell Rimula 15W40, отработанных 250 часов и 500 часов, как и следовало ожидать, подобны, но процентное содержание фракций в масле, отработанном 250 часов меньше, чем в масле, отработанном 500 часов. Характер этих распределений иной, чем у масла M-10G2CS (420 часов). Возможности предлагаемого метода для высокодисперсных систем ограничены очень медленным оседанием наноразмерных частиц в гравитационном поле.

Полученные в данной работе результаты могут быть полезны для дисперсионного анализа любых органических суспензий, содержащих микроразмерные ферромагнитные частицы.

Ключевые слова: судовые моторные масла, ферромагнитные частицы износа, седиментация, ЯМР релаксометрия, времена релаксации T_2^* .

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-280-287

Адрес для переписки:

Н.Я. Синявский
Калининградский государственный технический университет,
Советский проспект, д. 1, г. Калининград 236022, Россия
e-mail: nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru

Для цитирования:

А.Д. Глушков, Н.Я. Синявский, Н.А. Кострикова.
Дисперсионный анализ ферромагнитных частиц в отработанных моторных маслах.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 3. — С. 280—287.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-280-287

Address for correspondence:

N.Ya. Sinyavsky
Kaliningrad State Technical University,
Sovetsky Prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russia
e-mail: nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru

For citation:

A.D. Glushkov, N.Ya. Sinyavsky, and N.A. Kostrikova.
[Dispersion Analysis of Ferromagnetic Particles in Used Motor Oils].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 3, pp. 280—287 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-280-287

Dispersion Analysis of Ferromagnetic Particles in Used Motor Oils

A.D. Glushkov, N.Ya. Sinyavsky, and N.A. Kostrikova

Kaliningrad State Technical University,
Sovetsky Prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russia

Received 20.01.2025.

Abstract

Studying the content of ferromagnetic wear particles in used motor oil allows us to judge the degree of wear of the rubbing parts of the engine. This paper describes a new method for determining the fractional composition of a system of ferromagnetic wear particles in used motor oil, based on the kinetics of particle sedimentation in a gravity field and the instrumental time of transverse relaxation of NMR protons of hydrocarbons in a polydisperse suspension. Unlike traditional sedimentation analysis by continuous weighing, the proposed method uses a method of continuous measurement of the NMR relaxation time T_2^* . It is assumed that suspended particles increase the non-uniformity of the magnetic field of the relaxometer magnet and the apparatus time of spin-spin relaxation proportionally to the mass of the sediment.

An analytical expression for the particle size distribution and for the most probable equivalent radius for a mathematical model of the sedimentation curve is obtained. Two physical models of iron particles of different sizes introduced into fresh motor oils are investigated. It is shown that at the same iron concentration in engine oil, small particles make the magnetic field more non-uniform than large particles. The kinetics of changes in relaxation times T_2^* during sedimentation is studied. It was found that during sedimentation of ferromagnetic particles, the times of spin-lattice T_1 and spin-spin T_2 relaxation remain unchanged. To obtain the distribution of ferromagnetic particles, all necessary transformations of the data array $T_2^*(t)$ were performed numerically. It is shown that, in contrast to the unimodal distributions for model samples of fresh oils with iron particles, M-10G2CS oil used for 420 hours gives a distribution in a wide range of radii from 3 μm to 11 μm . The distributions of particle radii in Shell Rimula 15W40 oils used for 250 hours and 500 hours are, as expected, similar, but the percentage content of fractions in the oil used for 250 hours is less than in the oil used for 500 hours. The nature of these distributions is different from that of M-10G2CS oil (420 hours). The capabilities of the proposed method for highly dispersed systems are limited by the very slow settling of nanosized particles in a gravitational field.

The results obtained in this work can be useful for dispersion analysis of any organic suspensions containing micro-sized ferromagnetic particles.

Keywords: marine motor oils, ferromagnetic wear particles, sedimentation, NMR relaxometry, T_2^* relaxation times.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-280-287

Адрес для переписки:

Н.Я. Синявский
Калининградский государственный технический университет,
Советский проспект, д. 1, г. Калининград 236022, Россия
e-mail: nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru

Для цитирования:

А.Д. Глушков, Н.Я. Синявский, Н.А. Кострикова.
Дисперсионный анализ ферромагнитных частиц в отработанных
моторных маслах.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 3. — С. 280–287.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-280-287

Address for correspondence:

N.Ya. Sinyavsky
Kaliningrad State Technical University,
Sovetsky Prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russia
e-mail: nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru

For citation:

A.D. Glushkov, N.Ya. Sinyavsky, and N.A. Kostrikova.
[Dispersion Analysis of Ferromagnetic Particles in Used Motor Oils].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 3, pp. 280–287 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-280-287

Список использованных источников

1. Rațiu S., Mihon L., Laza I., and Armioni M. A Review on the Contamination of Used Engine Oil // *Ingineria automobilului*. — 2020 (57), 20—25
2. Синявский Н.Я., Корнева И.П., Иванов А.М. и др. Исследование судовых моторных масел методом динамического рассеяния света // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2020, № 4(50)1, 103—108
3. Sinyavsky N., Korneva I., Ivanov A., and Kostrikova N. Study of Used Marine Oils by the Photon Correlation Spectroscopy Method // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. — 2021, 1181(1):012001
4. Fitch J. Tricks to Classifying Wear Metals and Other Used Oil Suspensions // *Noria Corporation*. — <https://www.machinerylubrication.com/Read/3/wear-metals-oil-suspensions>
5. Wear Debris Analysis & Debris Monitoring Equipment. Sietronics Pty Ltd. — <https://www.sietronics.net/analex-wear-debris>
6. Govindarajan N. and Gnanamoorthy R. Ferroggraphy – A Procedure for Measuring Wear Rate // *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. — 2008 (15), no. 5, 377—381
7. Seifert W.W. and Westcott V.C., A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil // *Wear*. — 1972 (21), no. 1, 27—42
8. Синявский Н.Я., Иванов А.М., Кострикова Н.А. Анализ частиц продуктов износа в отработанных судовых моторных маслах // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2021, № 4-4(54), 44—48
9. Корнева И.П., Синявский Н.Я., Кострикова Н.А. Исследование судовых моторных масел с продуктами износа оптическими методами // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2022, № 4(3), 72—78
10. Chavhan G., Babyn P., Thomas B., Shroff M., and Haacke E. Principles, Techniques, and Applications of T_2^* -based MR Imaging and Its Special Applications // *RadioGraphics*. — 2009 (29), no. 5, 1433—1449
11. Tang Y., Chen T., Zhang X., and Huang X. GRE T_2^* -Weighted MRI: Principles and Clinical Applications // *BioMed Research International*. — 2014, no. 1, 312142
12. Sinyavsky N. and Mershev I. Marine Engine Oil Diagnostics by Means of NMR Spectroscopy and Relaxometry of Protons // *Journal of Eta Maritime Science*. — 2022 (10), no. 3, 195—201
13. Miao R.S. and Saxena S.C. A Theory for Agglomeration and Sedimentation of Ferromagnetic Particles Suspended in a Hydrocarbon Liquid and Exposed to a Magnetic Field // *Powder Technology*. — 1996 (86), no. 2, 187—194
14. D'yachenko S.V., Kondrashkova I.S., and Zhernovoi A.I. NMR Studies of the Sedimentation of Ferromagnetic Nanoparticles in a Magnetic

Fluid // *Technical Physics*. — 2017 (62), no. 10, 1602—1604

15. Benedikt E. Anisotropy of Ferromagnetic Powder Particles // *Journal of Applied Physics*. — 1942 (13), 105—109
16. Штыхнов Г.С. // «Строительство и архитектура» серии «Известия высших учебных заведений СССР». — 1959, № 4(10)

References

1. Rațiu S., Mihon L., Laza I., and Armioni M. A Review on the Contamination of Used Engine Oil // *Ingineria automobilului*. — 2020 (57), 20—25
2. Sinyavsky N.Ya., Korneva I.P., Ivanov A.M. i dr. Issledovaniye sudovykh motornykh masel metodom dinamicheskogo rasseyaniya sveta // *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii*. — 2020, № 4(50)1, 103—108
3. Sinyavsky N., Korneva I., Ivanov A., and Kostrikova N. Study of Used Marine Oils by the Photon Correlation Spectroscopy Method // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. — 2021, 1181(1):012001
4. Fitch J. Tricks to Classifying Wear Metals and Other Used Oil Suspensions // *Noria Corporation*. — <https://www.machinerylubrication.com/Read/3/wear-metals-oil-suspensions>
5. Wear Debris Analysis & Debris Monitoring Equipment. Sietronics Pty Ltd. — <https://www.sietronics.net/analex-wear-debris>
6. Govindarajan N. and Gnanamoorthy R. Ferroggraphy – A Procedure for Measuring Wear Rate // *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. — 2008 (15), no. 5, 377—381
7. Seifert W.W. and Westcott V.C., A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil // *Wear*. — 1972 (21), no. 1, 27—42
8. Sinyavsky N.Ya., Ivanov A.M., Kostrikova N.A. Analiz chastits produktov iznosa v otrabotannykh sudovykh motornykh maslakh // *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii*. — 2021, № 4-4(54), 44—48
9. Korneva I.P., Sinyavsky N.Ya., Kostrikova N.A. Issledovaniye sudovykh motornykh masel s produktami iznosa opticheskimi metodami // *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii*. — 2022, № (3), 72—78
10. Chavhan G., Babyn P., Thomas B., Shroff M., and Haacke E. Principles, Techniques, and Applications of T_2^* -based MR Imaging and Its Special Applications // *RadioGraphics*. — 2009 (29), no. 5, 1433—1449
11. Tang Y., Chen T., Zhang X., and Huang X. GRE T_2^* -Weighted MRI: Principles and Clinical Applications // *BioMed Research International*. — 2014, no. 1, 312142
12. Sinyavsky N. and Mershev I. Marine Engine Oil Diagnostics by Means of NMR Spectroscopy and Relaxometry of Protons // *Journal of Eta Maritime Science*. — 2022 (10), no. 3, 195—201
13. Miao R.S. and Saxena S.C. A Theory for Agglomeration and Sedimentation of Ferromagnetic

- Particles Suspended in a Hydrocarbon Liquid and Exposed to a Magnetic Field // Powder Technology. — 1996 (**86**), no. 2, 187—194
14. **D'yachenko S.V., Kondrashkova I.S., and Zhernovoi A.I.** NMR Studies of the Sedimentation of Ferromagnetic Nanoparticles in a Magnetic Fluid // Technical Physics. — 2017 (**62**), no. 10, 1602—1604
15. **Benedikt E.** Anisotropy of Ferromagnetic Powder Particles // Journal of Applied Physics. — 1942 (**13**), 105—109
16. **Shtykhov G.S.** // «Stroitel'stvo i arkhitektura» serii «Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy SSSR». — 1959, № 4 (10)

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.
Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11
Full text of articles can be purchased from the editorial office.
Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11
E-mail: FWJ@tut.by