Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 11

ТВЕРЬ 2019

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2019. – Вып. 11. – 680 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2019

© Тверской государственнй университет, 2019

УДК 621.891

Оригинальная статья

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ НАНОДИСПЕРСНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ

А.Н. Болотов, О.О. Новикова

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

170026, Россия, Тверь, наб. А. Никитина, 22

alnikbltov@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.564

Аннотация: В работе представлены результаты исследования магнитных свойств магнитных смазочных масел в исходном состоянии и после трибовоздействий. Определены параметры состава и структуры масел, изменяющиеся при трении и приводящие к потере его магнитных свойств. Свойства масел измерялись оригинальным магнитометром с датчиками Холла.

Ключевые слова: *магнитные смазочные масла, трение, изнашивание, смазка, намагниченность магнитного масла, полярность дисперсионной среды.*

1. Введение

Использование магнитных смазочных масел в узлах трения современного наукоемкого оборудования повышает их ресурс, энергоэффективность и улучшает фрикционные характеристики [1-5]. Спектр трибоузлов с магнитными маслами в качестве смазки и рабочего тела необычайно широк: подшипники скольжения, направляющие, герметизаторы, магнитные муфты и др. [6, 7]. Большой диапазон областей применения и условий эксплуатации таких устройств определяет предъявляемые к ним нагрузочно-температурные требования. Воздействующие в процессе эксплуатации на магнитные масла высокие температуры, давление и сдвиговые напряжения в зоне трения, приводят к изменению их химического состава в результате деструкции молекул, химического взаимодействия молекул с поверхностью и атмосферным газом, к потере магнитными частицами магнитных свойств и нарушению коллоидной стабильности масла [8, 9].

Исследование кривых перемагничивания магнитных масел, предоставит большой объем информации на основании которого можно проследить динамику изменения содержания магнитной и немагнитной фаз в жидкости-носителе, оценить эффективный размер частиц дисперсной фазы, исследовать коллоидную стабильность масла, определить основные магнитные характеристики, необходимые при проектировании узлов трения с магнитными маслами. Анализ кривых намагничивания магнитного масла, снятых при моделировании реальных трибовоздействий позволит быстро и эффективно оценивать возможность применения магнитных масел в различных узлах трения, а также целенаправленно улучшать их функциональные свойства.

Целью настоящего исследования является изучение магнитных

свойств магнитных смазочных масел в исходном состоянии и после трибовоздействий с учетом их состава и структуры.

2. Теоретические вопросы экспериментальных исследований

В первом приближении без учета взаимодействия между однодоменными частицами и полидисперсности частиц магнитное масло можно представить как суперпарамагнитную жидкость, процесс намагничивания которой подчиняется теории Ланжевена [10]. В этом случае теоретическая кривая зависимости намагниченности M магнитного масла от напряженности магнитного поля H описывается ланжевеновской функцией:

$$M = M_s \left[\operatorname{cth} \left(\frac{\mu_0 m H}{kT} \right) - \frac{kT}{\mu_0 m H} \right], \quad (1)$$

где $M_s = \varphi J_s$ – намагниченность насыщения магнитного масла; φ, J_s – объемная концентрация и намагниченность насыщения магнитной фазы (магнетита), μ_0 – магнитная постоянная, m – магнитный момент частиц, k – постоянная Больцмана, T – температура.

В реальных магнитных маслах (жидкостях) наблюдается полидисперсность магнитных частиц. В слабых полях главный вклад в намагниченность вносят крупные ферромагнитных частицы, легко ориентируемые магнитным полем, а выход на насыщение определяется мелкими феррочастицами, для ориентации которых требуются большие поля. Учитывая это, из экспериментальной кривой намагничивания, основываясь на теоретических зависимостях, можно по данным магнитных измерений определять размер наиболее крупных и мелких частиц дисперсной фазы магнитного масла [10, 11].

На основании магнитогранулометрического метода [10] диаметр d_0 крупных магнитных частиц в жидкости определяется из выражения (1) при напряженности магнитного поля $H \rightarrow 0$ по формуле:

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{18\chi kT}{\mu_0 \pi M_s J_s}}, \quad (2)$$

где χ – начальная магнитная восприимчивость, которая легко находится по начальному участку экспериментальной кривой намагничивания. Диаметр d_∞ наиболее мелких магнитных частиц так же можно установить из выражения (1) при условии $H \rightarrow \infty$:

$$d_\infty = \sqrt[3]{\frac{6kT}{\pi \mu_0 H_0 J_s}} \quad (3)$$

здесь $1/H_0$ – отрезок, отсекаемый на оси абсцисс касательной к начальному участку экспериментальной кривой зависимости

намагниченности жидкости от обратного значения напряженности поля $M(1/H)$.

3. Материалы и методы исследования

Распространенные лабораторные магнитометры, применяемые в настоящее время для изучения магнитных свойств магнитных жидкостей [12-15], имеют существенные недостатки. В ряде случаев, при исследованиях кривой намагничивания, например, баллистическим методом, это недостаточно большая величина намагничивающего поля в соленоиде и невысокая точность измерения магнитных характеристик вещества, обусловленная тем, что измерения проводятся в разомкнутой магнитной цепи. В настоящее время, для изучения магнитных свойств твердых тел все шире используются магнитометры с датчиками Холла. Этот метод может наиболее полно удовлетворить всему комплексу требований, предъявляемых к исследованию магнитных свойств магнитных жидкостей. Поэтому именно разработанный нами холловский магнитометр использовался в исследованиях [16].

Испытания на трение и износ в условиях граничного трения проводились на 3-х пальчиковой машине трения МТП [17]. Изучены следующие магнитные смазочные масла: ММ1-ПЭС4 (основа – ПЭС-4, дисперсная фаза – магнетит (10 об.%) стабилизированный жирной кислотой), ММ-ПЭСВ (ПЭС-В-2 и 10 об.% магнетита стабилизированного модифицированным хлорсилоксаном), ММ-И (индустриальное масло и 8 об.% магнетита стабилизированного олеиновой кислотой), ММ-ПЭС5 (ПЭС-5 и 5 об.% магнетит стабилизированного жирной кислотой), ММ2-ПЭС4 (ПЭС-4 и железо 2,5 об.% стабилизированный модифицированным хлорсилоксаном), ММ-П (перфторполиэфир ПЭФ-240, магнетит стабилизированный жирной кислотой). Магнитные свойства масел сравнивались с аналогичными свойствами классической маловязкой магнитной жидкостью с хорошей коллоидной стабильностью приготовленной на основе керосина и содержащей 7 об.% магнетита, стабилизированного олеиновой кислотой.

Анализ изменений магнитных свойств, происходящих в масле после длительной эксплуатации (около 140 часов) в узлах трения проведен на примере масла ММ-П, имеющего намагниченность ~ 20 кА/м, плотность $1,3$ г/см³. Масло изготовлено на основе перфторполиэфира, отличающегося высокой термической и окислительной стабильностью (установлено, что в присутствии некоторых металлов, например, железа термическая стабильность эфира существенно снижается).

В процессе трения в смазочном материале накапливаются магнитные и немагнитные частицы износа, продукты трибополимеризации и

деструкции смазочных материалов [18, 19]. Кроме того, в состав масел вводят для улучшения их смазочных свойств различные присадки и наполнители. Это все может влиять на структуру масла, коллоидную стабильность и, следовательно, на объемные магнитные свойства.

Для изучения влияния магнитных и немагнитных наполнителей в модельное магнитное масло, изготовленное на основе керосина, добавляли дисперсные добавки. В базовое масло вводился порошок твердой смазки дисульфид молибдена с дисперсностью частиц около 1 мкм в количестве ~1,5 об.%, характерном для композиционных смазочных материалов. В это же магнитное масло вводился полидоменный порошок феррита бария дисперсностью 1÷5 мкм, содержание которого в 1 см³ масле составляло 120 мг.

4. Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 приведены теоретическая и экспериментальная кривые зависимости намагниченности магнитного масла от напряженности намагничивающего поля масла на основе керосина с 7 % объемным содержанием магнетита, стабилизированного олеиновой кислотой. Кривая 1 получена с использованием магнетометра, кривая 2 – теоретически вычисленная по формуле (1) зависимость. Наблюдается некоторое расхождение между расчетной и экспериментально установленной зависимостями. Однако, при необходимости для проектных расчетов подшипниковых узлов, смазываемых магнитным маслом, можно использовать кривую намагничивания построенную по формуле (1).

Средний размер коллоидных частиц магнетита, определенных методом электронной микрофотографии, составил 12 нм. Рассчитанные по формулам (2) и (3) диаметры ферричастиц составили соответственно $d_0 = 12,5$ нм и $d_\infty = 9,6$ нм.

Расхождение между экспериментальной кривой намагничивания и вычисленной, а также заниженное значение среднего размера ферричастиц, полученного из магнитных измерений, по сравнению с данными электронно-микроскопических исследований, можно объяснить двумя причинами. Во-первых, возможно химическое взаимодействие молекул олеиновой кислоты с магнетитом, сопровождающееся образованием немагнитного слоя олеата железа, либо превращение магнетита в соединения с меньшей спонтанной намагниченностью в результате окисления. Именно поэтому содержание дисперсных частиц, определенное гравиметрическим методом и по экспериментальной намагниченности насыщения магнитного масла, может отличаться в 1,4–1,8 раза. Во-вторых, сказывается межчастичное магнитостатическое взаимодействие, которое, в частности, приводит к образованию

устойчивых агломератов, у которых наблюдается взаимная компенсация магнитных моментов. Намагничивание агломератов происходит за счет поворота вектора намагниченности, удерживаемого полем анизотропии, а для этого требуются повышенные магнитные поля.

На рис. 2 приведены полученные экспериментально кривые намагничивания ряда магнитных масел, используемых для оптимизации триботехнических параметров узлов трения с магнитной смазкой. Количественно приведенные кривые существенно отличаются значениями начальной магнитной проницаемости и намагниченностью насыщения. На качественном уровне ход кривых намагничивания вполне объясняется концентрацией и составом магнитной дисперсной фазы. По мере увеличения концентрации магнитной дисперсной фазы магнитное насыщение наблюдается во все более высоких полях, превышающих $1,5 \cdot 10^4$ А/м.

Рис. 1. Кривые намагничивания магнитного масла на основе керосина с 7 % содержанием магнетита: 1 — экспериментальная зависимость, 2 — теоретическая зависимость.

Рис. 2. Кривые намагничивания масел: 1 — ММ-ПЭС4, 2 — ММ-ПЭСВ, 3 — ММ-И, 4 — ММ1-ПЭС5, 5 — ММ2-ПЭС5.

Результаты анализа изменения магнитных свойств, происходящие в масле ММ-П после длительной эксплуатации приведены на рис. 3. Там также показана кривая намагничивания исходного масла (до испытаний). Трибовоздействия на магнитное масло приводят к тому, что кривая намагничивания масла собранного с дорожки трения после 140-часовой работы в качестве смазки идет значительно ниже. Это свидетельствует о частичной потере магнитных свойств отработанным маслом. Отметим, что около дорожки трения находилось масло, которое вообще не реагировало на магнитное поле.

Если учесть, что в отработанном масле уменьшилось содержание дисперсионной среды, а значит, увеличилось удельное содержание ферричастиц, то снижение магнитных свойств будет выше, чем следует из графика на рис. 3. Как известно [20], в процессе трения на пятнах фрикционного контакта возникают большие давления и возможны локальные всплески температуры до 600°C и выше в течение 10^{-6} с. Поэтому ухудшение магнитных свойств масла можно объяснить десорбцией и даже деструкцией молекул ПАВ, покрывающих ферричастицы, что стимулирует агломерацию частиц. При этом возможно окисление дисперсной фазы масла до слабомагнитных оксидных соединений железа и коагулирование частиц с образованием агломератов и потерей магнитных свойств. Искусственное нагревание магнитного масла приводит к подобному результату (см. рис. 3).

Результаты изучения влияния наполнителей с различными магнитными свойствами на ход кривых намагниченности приведены на рис. 4. В качестве модельного масла использовалась магнитная жидкость на основе керосина. После тщательного перемешивания полученная суспензия отстаивалась и для исследований отбиралась относительно устойчивая часть жидкости с наполнителем.

Рис. 3. Кривые намагничивания магнитного масла ММ-П: 1 – исходное масло, 2 – после нагревания при 100°C в течение 10 часов, 3 – после нагревания при 100°C в течение 50 часов, 4 – после 140 часов эксплуатации.

Рис. 4. Кривые намагничивания магнитного масла: 1 – с добавкой дисульфида молибдена, 2 – исходное масло, 3 – с добавкой феррита, 4 – с избыточным содержанием олеиновой кислоты.

Исследования показали (см. рис. 4), что кривая намагничивания модельного масла, изготовленного на основе керосина, с добавкой диамагнитного порошка дисульфида молибдена идет выше (рис. 4,

кривая 1) по сравнению с исходной кривой для магнитной жидкости без добавок (рис. 4, кривая 2). Это несколько неожиданно и может быть объяснено повышением концентрации дисперсной фазы в коллоидном растворе магнитной жидкости из-за уменьшения дисперсионной среды, унесенной отделившимися в гравитационном поле частицами дисульфида молибдена.

Когда в магнитное масло вводился полидоменный порошок феррита бария намагниченность насыщения гравитационно устойчивой части масла уменьшалась (рис. 4, кривая 3). В данном случае, по-видимому, определенную роль играет сила притяжения между монодоменными коллоидными ферричастицами масла и частицами наполнителя. Действие указанных сил приводит к увеличению размеров и массы частиц наполнителя в результате присоединения к ним частиц магнетита, которые в процессе гравитационной седиментации оседают, а это в свою очередь приводит к снижению объемных магнитных свойств масла.

В процессе граничного и гидродинамического трения наблюдается термодеструкция и трибополимеризация дисперсионных сред, сопровождаемых увеличением содержания в коллоидном растворе дифинильных молекул, что моделировалось введением в масло избыточного содержания ПАВ-олеиновой кислоты, установлено следующее. С повышением содержания олеиновой кислоты изменяется полярность основы масла и поэтому снижается способность масла сохранять коллоидную стабильность во внешних магнитных полях [8, 9]. В результате в магнитном масле может происходить необратимая флокуляция дисперсных частиц (при необходимости они легко могут быть отделены магнитной или гравитационной сепарацией). Содержание в масле флокул (агломератов) приводит к более медленному росту намагниченности при увеличении магнитного поля (см. рис. 4, кривая 4), т.е. магнитная проницаемость уменьшается.

5. Заключение

Показано, что трибовоздействия на магнитное масло приводят к снижению его намагниченности в результате окисления магнитных дисперсных частиц и отделения дисперсионной среды у масел с невысокой коллоидной устойчивостью. Изменение полярности дисперсионной среды масел при трении может привести к флокуляции магнитных частиц, а это, следовательно, к снижению магнитной проницаемости масла. Введение в магнитное масло твердых добавок может различным образом изменить магнитные свойства, что во многом зависит от дисперсности частиц добавки, их плотности и магнитного состояния. Подтверждено, что концентрация магнитных дисперсных частиц в масле, определенная по

намагниченности несколько ниже, чем определенная гравиметрическим методом из-за немагнитной оболочки частиц.

Таким образом, при проектировании и эксплуатации узлов трения, смазываемых магнитными маслами, необходимо учитывать установленные изменения их магнитных свойств и не допускать работу в экстремальных условиях, приводящих к потере магнитных свойств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-48-690001).

Библиографический список

1. **Орлов, Д.В.** Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев и др.; под общ. ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. – М.: Машиностроение, 1993. – 268 с.
2. **Zahn, M.** Magnetic fluid and nanoparticle applications to nanotechnology / M. Zahn // Journal of Nanoparticle Research. – 2001. – V. 3. – I. 1. – P. 73-78.
3. **Болотов, А.Н.** Расчет и оптимизация постоянных магнитов для специальных подшипниковых опор: монография / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. – Тверь: ТвГТУ, 2013. – 123 с.
4. **Uhlmann, E.** Application of magnetic fluids in tribotechnical systems / E. Uhlmann // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – V. 252. – P. 336-340.
5. **Болотов, А.Н.** Исследование триботехнических свойств пьезомагнитожидкостных подшипников / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – № 10. – С. 23-29.
6. **Болотов, А.Н.** Магнитные масла триботехнического назначения / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2009. – Вып. 1. – С. 5-9.
7. **Odenbach, S.** Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications / S. Odenbach // Lecture Notes in Physics. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – 256 p.
8. **Болотов, А.Н.** Исследование структурной стабильности магнитных масел для узлов трения // А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, И.В. Горлов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2014. – Т. 4. – № 2 (20). – С. 15-17.
9. **Болотов, А.Н.** О зависимости коллоидной устойчивости магнитных жидкостей от диэлектрической проницаемости стабилизатора и дисперсионной среды / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология. – 2017. – Т. 60. – № 4. – С. 75-81.
10. **Фертман, В.Е.** Магнитные жидкости: справочное пособие / В.Е. Фертман. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 184 с.
11. **Rosensweig, R.E.** Ferrohydrodynamics / R.E. Rosensweig. – Cambridge University Press, 1985. – 344 p.
12. **Лебедев, А.В.** Дипольное взаимодействие частиц в магнитных жидкостях / А.В. Лебедев // Коллоидный журнал. – 2014. – Т. 76. – № 3. – С. 363-371.
13. **Чечерников, В.И.** Магнитные измерения / В.И. Чечерников. – М.: МГУ, 1969. – 388 с.
14. **Полунин, В.М.** Акустические эффекты в магнитных жидкостях / В.М. Полунин. – М.: Физматлит, 2008. – 208 с.

15. Пат. 2402032, Российская Федерация МПК G 01R 33/12. Способ и устройство для измерения намагниченности жидкого вещества, в частности, магнитной жидкости / Перминов С.М., Перминова А.С.: заявитель и патентообладатель Ивановский государственный энергетический университет. – № 2009101546/28; заявл. 19.01.2009; опубл. 20.10.2010, Бюл. № 29. – 8 с.
16. **Bolotov, A.N.** Magnetometer for studying magnetic properties of liquid and dispersed substances / A.N. Bolotov, N.V. Lochagin, G.S. Eliseeva, L.D. Shevchuk // *Industrial Laboratory*. – 1988. – Т. 53. – № 11. – С. 1071-1072.
17. **Болотов, А.Н.** Исследование триботехнических свойств наноструктурных магнитных смазочных масел с различными дисперсионными средами / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков // *Трение и износ*. – 2017. – Т. 38. – № 2. – С. 107-113.
18. **Заславский, Ю.С.** Трибология смазочных материалов / Ю.С. Заславский. – М.: Химия, 1991. – 239 с.
19. **Климов, К.И.** Антифрикционные пластичные смазки / К.И. Климов. – М.: Химия, 1988. – 160 с.
20. **Мышкин, Н.К.** Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 367 с.

References:

1. **Orlov, D.V.** Magnetic fluids in mechanical engineering / D.V. Orlov, Yu.O. Mikhalev et al.; pod obshch. red. D.V. Orlova, V.V. Podgorkova. – М.: Mashinostroenie, 1993. – 268 p. (In Russian).
2. **Zahn, M.** Magnetic fluid and nanoparticle applications to nanotechnology / M. Zahn // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2001. – V. 3. – I. 1. – P. 73-78.
3. **Bolotov, A.N.** Calculation and optimization of permanent magnets for special bearings: monograph / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova. – Tver: TvSTU, 2013. – 123 p. (In Russian).
4. **Uhlmann, E.** Application of magnetic fluids in tribotechnical systems / E. Uhlmann // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2002. – V. 252. – P. 336-340.
5. **Bolotov, A.N.** Investigation of the tribological properties of piezomagnetically fluid bearings / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizмах*. – 2010. – № 10. – P. 23-29. (In Russian).
6. **Bolotov, A.N.** Tribotechnical magnetic oils / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. – 2009. – I. 1. – P. 5-9. (In Russian).
7. **Odenbach, S.** Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications / S. Odenbach // *Lecture Notes in Physics*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – 256 p.
8. **Bolotov, A.N.** Research of magnetic oils' structural stability for friction units // A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova, I.V. Gorlov // *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI*. – 2014. – V. 4. – № 2 (20). – P. 15-17. (In Russian).
9. **Bolotov, A.N.** On the dependence of the colloidal stability of magnetic fluids on the dielectric constant of the stabilizer and dispersion medium / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Seriya: khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. – 2017. – V. 60. – № 4. – P. 75-81. (In Russian).
10. **Fertman, V.E.** Magnetic fluids: a reference guide / V.E. Fertman. – Minsk: Vyshejschaya

shkola, 1988. – 184 p. (In Russian).

11. **Rosensweig, R.E.** Ferrohydrodynamics / R.E. Rosensweig. – Cambridge University Press, 1985. – 344 p.

12. **Lebedev, A.V.** Dipole interparticle interaction in magnetic fluids / A.V. Lebedev // Colloid Journal. – 2014. – V. 76. – № 3. – P. 334-341.

13. **Chechernikov, V.I.** Magnetic measurements / V.I. Chechernikov. – M.: MSU, 1969. – 388 p. (In Russian).

14. **Polunin, V.M.** Acoustic effects in magnetic fluids / V.M. Polunin. – M.: Fizmatlit, 2008. – 208 p. (In Russian).

15. **Pat. 2402032, Russian Federation IPC G 01R 33/12.** Method and device for measuring the magnetization of a liquid substance, in particular magnetic fluid / Perminov S.M., Perminova A.S.: заявитель i патентообладатель Ивановский государственный энергетический университет. – № 2009101546/28; заявл. 19.01.2009; опubl. 20.10.2010, I. № 29. – 8 p. (In Russian).

16. **Bolotov, A.N.** Magnetometer for studying magnetic properties of liquid and dispersed substances / A.N. Bolotov, N.V. Lochagin, G.S. Eliseeva, L.D. Shevchuk // Industrial Laboratory. – 1988. – V. 53. – № 11. – С. 1071-1072.

17. **Bolotov, A.N.** Studying tribotechnical properties of nanostructured lubricating oils with various dispersive media / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // Journal of Friction and Wear. – 2017. – V. 38. – I. 2. – P. 121-125.

18. **Zaslavskij, Yu.S.** Lubricant tribology / Yu.S. Zaslavskij. – M.: Khimiya, 1991. – 239 p. (In Russian).

19. **Klimov, K.I.** Anti-friction greases / K.I. Klimov. – M.: Khimiya, 1988. – 160 p. (In Russian).

20. **Myshkin, N.K.** Friction, lubrication, wear. Physical foundations and technical applications of tribology / N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets. – M.: FIZMATLIT, 2007. – 367 p. (In Russian).

Original paper

MAGNETIC PROPERTIES OF THE MAGNETIC NANODISPERSED LUBRICANT OILS

A.N Bolotov, O.O Novikova

Tver State Technical University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.564

Abstract: In this work we adduce the results of the research of a magnetic properties of the magnetic lubricant oil in original condition and after triboeffects. We determined the parameters of the oil composition and structure changing in friction and causing the degradation it magnetic properties. The oils properties were measured with an original magnetometer with a Hall sensor.

Keywords: *magnetic lubricating oils, friction, wear, lubricant, magnetic oil magnetization intensity, dispersion phase polarity.*

Болотов Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Новикова Ольга Олеговна – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Alexander N. Bolotov – Dr. Sc., Professor, Head of the Applied Physics Department, Tver State Technical University

Olga O. Novikova – Ph. D., Docent, Docent of the Applied Physics Department, Tver State Technical University

Поступила в редакцию/received: 23.06.2019; после рецензирования/revised: 21.08.2019; принята/accepted 19.09.2019.