

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 государственной
университет, 2019

УДК 621.891

Оригинальная статья

СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ НАНОЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ЭФИРОВ КАРБОНОВЫХ КИСЛОТ

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/2019.11.555

Аннотация: Приведены технологические особенности синтеза и результаты исследований свойств относительно маловязких магнитных смазочных наножидкостей с дисперсионной средой на основе диэфиров карбоновых кислот. Показаны некоторые физико-химические и трибологические отличительные особенности диэфирных магнитных смазочных масел. Изучены смазочные свойства магнитных наножидкостей при различных условиях трения и установлены их специфические характеристики. Проанализировано влияние на трение ряда противоизносных присадок.

Ключевые слова: магнитная смазочная наножидкость, трение, изнашивание, смазка, антифрикционные и противоизносные присадки.

1. Введение

Магнитные наножидкости и другие коллоидные материалы на их основе обладают уникальным сочетанием механических, физических и химических свойств и поэтому научный интерес к ним остается очень высоким [1-3]. Большие надежды ученые и инженеры возлагают на наножидкости триботехнического назначения, которые имеют аномально высокие для жидких сред магнитные свойства и поэтому могут подаваться в зону трения и локализоваться там под действием внешнего поля определенной структуры. Использование магнитных смазочных наножидкостей (масел) в узлах трения современных машин и механизмов повышает их ресурс, энергоэффективность и улучшает фрикционные характеристики [4-8]. Спектр трибоузлов с магнитными наножидкостями в качестве смазки и рабочего тела необычайно широк: подшипники скольжения, направляющие, герметизаторы, магнитные муфты и др. Однако существующие магнитные смазочные наножидкости имеют относительно высокую вязкость и это затрудняет их использование в узлах жидкостного трения с большими значениями скорости сдвига [9-11].

Поэтому, цель работы заключалась в создании магнитных смазочных наножидкостей с удовлетворительными трибосвойствами и невысокой вязкостью. В работе [12] на основе комплексных экспериментальных исследований обоснован выбор диэфиров карбоновых кислот для создания на их основе маловязких смазочных наножидкостей. Так же в указанной статье обоснован выбор других структурных компонентов магнитной наножидкости – ПАВ-стабилизатора, дисперсной фазы и присадок, снижающих трение и износ. Остановимся на описании основ технологии

синтеза магнитных маловязких смазочных наножидкостей с высокой коллоидной стабильностью и приведем результаты экспериментального изучения влияния на их смазочные свойства присадок и наполнителей.

2. Методы и средства изучения триботехнических и физико-химических свойств магнитных наножидкостей

Исследования смазочных свойств магнитных наножидкостей при высоких контактных давлениях проводились на трехшариковой машине трения МТШ-М [13]. Для экспериментов были выбраны образцы из стали ШХ-15. Триботехнические испытания магнитных наножидкостей в области средних давлений проводились по схеме трения диск – палец на машине трения МТП [13]. Материалы пары трения Сталь 3 – бронза ОСЦ5-5-5. Реологические свойства магнитных наножидкостей определялись на ротационном вискозиметре в различных поперечных магнитных полях. Для оценки коррозионных свойств наножидкостей при циклирующих механических напряжениях использовался прибор [14].

3. Основы технологии синтеза наножидкостей

Стандартная технология синтеза магнитного коллоида [15], включает следующие этапы: получение магнетита химической конденсацией (метод Элмора); отмывка магнетита от солей аммиака; пептизация; разбавление дисперсионной средой; удаление следов воды. Однако этот технологический процесс имеет ряд существенных недостатков. Осажденный магнетит должен тщательно отмываться от солей, а для промывки высокодисперсного осадка требуется сложное аппаратное оформление процесса. Длительный контакт на отмывке частиц, не защищенных адсорбционными оболочками, ведет к образованию конгломератов (конденсации частиц) и ухудшению коллоидной стабильности магнитной жидкости. Поэтому, для получения магнитных наножидкостей на основе диэфиров использован метод синтеза в эмульсии. Суть метода заключается в следующем. В эмульсию, образованную диэфиром карбоновой кислоты, ПАВ-стабилизатором рицинолевой кислотой и водой при перемешивании и температуре $70 \div 90^\circ\text{C}$ вводятся последовательно аммиак (водн.) и раствор солей железа (II и III валентных). На поверхности образующихся частиц магнетита адсорбируется ПАВ-стабилизатор и переводит его в органическую фазу. Затем полученный коллоид декантируют и промывают несколькими порциями дистиллированной воды. Захваченная вода удаляется выпариванием при перемешивании. Для удаления крупных агрегатов из магнитных частиц коллоид загружают в центрифугу и выдерживают в поле центробежных сил при $5600g$ в течение двух часов.

После отработки технологических параметров процесса синтеза получены магнитные наножидкости со свойствами, указанными в Таблице 1. Там же для сравнения приведены свойства наиболее распространенной магнитной наножидкости ММ1-ПЭС на основе полиэтилсилоксана [7].

Таблица 1. Некоторые характеристики синтезированных магнитных наножидкостей (H – напряженность магнитного поля).

Марка наножидкости	Основа наножидкости	Вязкость, Па·с (20 °С, $H = 2 \cdot 10^5$ А/м)	Намагниченность, кА/м	Испаряемость при 100 °С, 10^{-7} кг/см ² ·ч	Устойчивость при ($\nabla H =$ $5 \cdot 10^7$ А/м ²)
ММ1-ДОС	Диоктилсебагинат	0,08	30	0,9	1,73
ММ2-ДОС	Диоктилсебагинат	0,2-0,5	23	0,65	1,45
ММ1-ДОФ	Диоктилфталат	0,2	34	0,8	1,5
ММ1-ДБС	Дибутилсебагинат	0,07	31	1,7	1,72
ММ1-ПЭС	ПЭС-5	2 - 4	23	0,6	1,65

На заключительном этапе в магнитную жидкость для получения смазочной магнитной наножидкости водят присадки при температуре 40÷50 °С и тщательно перемешивают. Для всех синтезированных магнитных наножидкостей агрегативная устойчивость нарушается, в случаях, когда градиент магнитного поля $gradH \geq 1,5 \cdot 10^8$ А/м². Если неоднородность поля в узле трения меньше указанного, образование агломератов из магнитных частиц затруднено и их абразивное действие нивелирует.

Для повышения устойчивости магнитных наножидкостей в магнитных полях предложено в качестве стабилизатора использовать олигоэфиры. Преимущество разработанного способа состоит в том, что синтез стабилизатора ведется непосредственно на магнитных частицах и это практически исключает стерические затруднения при образовании защитных оболочек. Кроме того, использование такого технологического фактора, как концентрация мономера, позволяет регулировать вязкость магнитной наножидкости в широких пределах, в зависимости от ее назначения. Характерные свойства диоктилсебагинатовой магнитной наножидкости ММ2-ДОС стабилизированной олигоэфиром ОЭ-3 на основе 12-гидрокси-9-цис-октадеценовой кислоты приведены в Таблице 1. Эта наножидкость по сравнению с маслом ММ1-ДОС более устойчива в магнитных полях, менее летучая, но имеет повышенную вязкость.

Для улучшения смазочных свойств наножидкостей в их состав добавляли триботехнические присадки и добавки, описание и обоснование которых дано в работе [12].

4. Свойства синтезированных магнитных наножидкостей.

В Таблице 2 представлены смазочные свойства магнитных наножидкостей на основе диэфиров карбоновых кислот, определенные при различных контактных давлениях в присутствии магнитного поля в зоне трения.

Таблица 2. Свойства магнитных наножидкостей на основе диэфиров (f – коэффициент трения, I_h – интенсивность линейного износа, d – диаметр пятна износа).

Смазочная композиция	Машина трения МТП		Машина трения МТШ	
	f	$I_h, 10^{-9}$	f	d , мм
1. ДОС	0,07	1,2	0,17	0,40
2. ММ1-ДОС	0,11	2,7	0,17	0,42
3. ММ1-ДОС + 3 масс.% <i>Cu</i>	0,11	2,1	0,10	0,30
4. ММ1-ДОС + 5масс.% Протект – 100	-	-	0,06	0,25
5. ММ2- ДОС	0,11	2,0	0,19	0,61
6. ДОФ	0,18	3,1	0,22	0,54
7. ММ1-ДОФ	0,19	3,2	0,23	0,58
8. ДБС	0,08	2,3	0,17	0,40
9. ММ1-ДБС	0,09	2,5	0,18	0,41
10. ТМ-5-18	0,08	0,4	0,15	0,35

Диэфиры ДОС и ДБС имеют близкие смазочные свойства, которые выше, чем у диэфира ДОФ (см. данные Таблицы 2). Соответствующим образом ранжируются по этим свойствам и магнитные наножидкости на основе различных диэфиров. Диэфирные магнитные наножидкости превосходят по трибосвойствам наножидкости на основе силоксанов, например, классическую наножидкость ММ1-ПЭС на основе полиэтилсилоксана (см. данные Таблицы 3).

Магнитная наножидкость ММ2-ДОС стабилизированная олигоэфиром ОЭ-3 несколько хуже снижает трение и износ, чем наножидкость на той же основе ММ1-ДОС, но наножидкость ММ2-ДОС имеет другое достоинство – высокую коллоидную устойчивость при трибовоздействиях. Использование олигомера для стабилизации наножидкости ММ2-ДОС увеличивает радиус адсорбционных оболочек и соответственно снижает вероятность образования конгломератов частиц в условиях трибоконтакта. Однако наножидкость ММ2-ДОС может найти лишь ограниченное применение из-за сложности технологии изготовления и реологических особенностей.

Металлоплакирующие свойства медного наполнителя, введенного в состав наножидкостей при умеренных давлениях, проявились слабо (см. Таблицу 3), наличия регулярной медной пленки на поверхностях трения не наблюдалось. По-видимому, сольватный слой образованный молекулами

поверхностно-активного вещества ЗН2ТЭ на поверхности медных частиц не позволяет им образовывать сильные металлические связи с поверхностью трения и тем самым модифицировать ее для изменения фрикционного взаимодействия. Небольшое изменение трения, происходящее после введения в состав магнитной и немагнитной наножидкости медного наполнителя, объясняется влиянием молекул ЗН2ТЭ, которые появляются в дисперсионной среде в результате десорбции с поверхности меди и повторно адсорбируются на трущихся поверхностях.

Очень эффективным оказался наполнитель Протект – 100 содержащий дисперсный твердосмазочный полимер тефлон. Однако действие наполнителя оказалось непродолжительным из-за быстрого срабатывания тефлона в зоне трения.

Эффективная, по литературным и нашим данным, присадка для дизелиров – трикрезилфосфат (ТКФ), позволила существенно улучшить противоизносные свойства магнитных наножидкостей (см. Таблицу 3), и которую можно рекомендовать для практического использования. Присадка МКФ-18, хотя и несколько улучшала свойства ДОС, но на свойства магнитной жидкости, при содержании 1–5% не оказывала положительного влияния.

Таблица 3. Влияние присадок и материалов трения на смазочные характеристики магнитных наножидкостей (f, I_h – коэффициент трения и интенсивность линейного износа определенные на машине трения МТП, f^*, d^* – коэффициент трения и диаметр пятна износа определенные на машине трения МТШ).

Смазочный материал	f / f^*	$I_h \cdot 10^9 / d^*$, мм
1. ММ1- ДОС	0,11/0,15	2,7/0,42
2. ММ1-ДОС +5 масс.% МКФ-18	0,1/0,28	2,6/0,68
3. ММ1-ДОС +10 масс.% ТКФ	0,07/-	1,3/-
4. ММ1- ДОС +10 масс.% ЗН2ТЭ	0,05/0,14	1,8/0,35
5. ММ1- ДОС +5 масс.% СУРМ-ВК	-/0,16	-/0,36
6. ММ1- ДОС +5 масс.% Моливан Л	-/0,09	-/0,31
7. ММ1- ДОС +10 масс.% ЭО-1	0,08/-	0,6/-
8. ММ1- ДОС +10 масс.% ЭО-2	0,11/-	2,2/-
9. ММ1-ДБС	0,09/-	2,5/-
10. ММ1-ДБС +10 масс.% ТКФ	0,09/-	2,3/-
11. ММ1-ДБС +10 масс.% ЗН2ТЭ	0,08/-	1,1/-
12. ММ1-ДБС +5 масс.% М-196	0,07/-	0,6/-
13. ММ1-ПЭС	0,14/-	14,5/-
14. ТАД-17	0,08/0,15	0,4/0,35

Наиболее сильно удалось снизить скорость изнашивания и трение при смазке магнитной наножидкостью ММ1-ДОС с помощью присадки ЭО-1, образующей прочные фторсодержащие адсорбционные слои

(пленки) на трущихся поверхностях. По другой гипотезе [17], при введении присадки ЭО-1 происходит существенное возрастание доли гидродинамической составляющей, причем без увеличения вязкости смазочной среды. При этом снижается доля микронеровностей с граничным режимом смазки и снижается износ.

Молибден – содержащая присадка Моливан Л, остающаяся продолжительное время одной из лучших присадок, оказывающих комплексное влияние на трение, позволила заметно улучшить свойства магнитных наножидкостей в условиях высоких контактных давлений. Кроме того, эта присадка не влияет на коллоидную структуру наножидкостей и не сильно изменяет их реологические свойства. Металлоорганическая добавка в наножидкости СУРМ-ВК показала низкую эффективность.

Для улучшения наножидкости ММ1-ДБС может быть рекомендована хлорсодержащая присадка ЗН2ТЭ. После трения образцов в наножидкости, содержащей эту присадку, на поверхности стального образца обнаружен слой металла, перенесенный с поверхности бронзового контртела. Микрорентгеноструктурный анализ показал, что стальная поверхность покрыта тонким слоем материала, состоящим в основном из меди и окиси железа. Вероятно, в присутствии указанной присадки протекает процесс растворения меди химически активной присадкой и последующего ее осаждения, а катализатором процесса являются частицы магнетита, поскольку без них это явление не наблюдается.

Описанные в работе экспериментальные данные убедительно подтверждают, что смазочные свойства магнитных наножидкостей можно существенно улучшить введением в их состав присадок и наполнителей. При некоторых режимах трения магнитные наножидкости показывают даже более высокие трибосвойства, чем традиционные немагнитные масла, например, масло ТМ-5-18 (см. Таблицу 2). Приведенные данные по свойствам магнитных наножидкостей на основе диэфиров карбоновых кислот позволяют утверждать, что в настоящее время по совокупно различным критериям (смазочные свойства, коллоидная стабильность, магнитоподвижность, рабочий диапазон температур) для практических целей можно рекомендовать в первую очередь наножидкость ММ1-ДОС с присадками и даже без них. Магнитная наножидкость характеризуется вязкостью в диапазоне $0,05 \div 1,5$ Па·с, точное значение которой зависит от концентрации магнетита и ПАВ-стабилизатора и может применяться для смазывания узлов трения, работающих при высоких и низких скоростях скольжения. Предельное напряжение сдвига у наножидкости в полях, характерных для подшипников (около 0,2 Тл), невелико – 25 Па, что незначительно усложняет подачу наножидкости в подшипник.

Наножидкость имеет намагниченность насыщения $25 \div 30$ кА/м, обладает хорошей коллоидной устойчивостью в градиентных магнитных полях и может выдерживать температуры до 170°C . Благодаря низкому давлению насыщенных паров наножидкость можно использовать в условиях пониженного давления газовой окружающей среды.

5. Заключение

Проведенные исследования позволили разработать основы технология получения коллоидно стабильных смазочных наножидкостей на основе диэфиров карбоновых кислот с намагниченностью насыщения $25 \div 35$ кА/м с относительно низкой вязкостью порядка 10^{-1} Па·с, которую можно регулировать посредством наложения магнитного поля или изменяя структуру сольватных оболочек. Кроме того, рассматриваемые наножидкости имеют низкое давление насыщенных паров и могут эксплуатироваться в широком температурном диапазоне.

Показано, что наиболее перспективной по совокупности физико-химических и триботехнических свойств является смазочная наножидкость полученная на основе диоктилсебацата.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-08-00614).

Библиографический список:

1. **Scherer, C.** Ferrofluids: properties and applications / C. Scherer, A.M. Figueiredo Neto // Brazilian Journal of Physics. – 2005. – V. 35. – No. 3A. – P. 718-727.
2. **Odenbach, S.** Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications / S. Odenbach // Lecture Notes in Physics. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – 256 p.
3. **Фролов, К.В.** Современная трибология: Итоги и перспективы / К.В. Фролов. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 480 с.
4. **Орлов, Д.В.** Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
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. **Uhlmann, E.** Application of magnetic fluids in tribotechnical systems / E. Uhlmann // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – V. 252. – P. 336-340.
7. **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.
8. **Фертман, В.Е.** Магнитные жидкости: справочное пособие / В.Е. Фертман. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 184 с.
9. **Ермаков, С.Ф.** Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Часть 2. Активное управление трением / С.Ф. Ермаков // Трение и износ. – 2012. – Т. 33. – № 3. – С. 275-283.
10. **Nada, G.S.** Static performance of finite hydrodynamic / G S. Nada, T.A. Osman // Journal

Bearings Lubricated by Magnetic Fluids with Couple Stresses. Tribology Letters. – 2007. – V. 27. – № 3. – P. 261-268.

11. **Мищак, А.** Трибологические свойства феррожидкости / А. Мищак // Трение и износ. – 2006. – Т. 27. – № 3. – С. 330-336.

12. **Болотов, А.Н.** Смазочные масла на основе наножидкостей / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 159-168.

13. **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.

14. **Болотов, А.Н.** Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 2 / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, Д.И. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. – 2014. – № 7. – С. 85-89.

15. **Байбуртский, Ф.С.** Магнитные жидкости: способы получения и области применения. – Режим доступа: [www.url: http://magneticliquid.narod.ru/authority/008.htm](http://magneticliquid.narod.ru/authority/008.htm). – 18.06.2019.

16. **Болотов, А.Н.** Роль магнитного поля при трении поверхностей, смазываемых магнитным маслом / А.Н. Болотов, Н.В. Лочагин, Ю.О. Михалев // Трение и износ. – 1988. – Т. 9. – № 5. – С. 870–878.

17. **Курапов, П.А.** Смазочные свойства фторорганических присадок в условиях полужидкостной смазки / П.А. Курапов // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 4. – С. 759-765.

References:

1. **Scherer, C.** Ferrofluids: properties and applications / C. Scherer, A.M. Figueiredo Neto // Brazilian Journal of Physics. – 2005. – V. 35. – No. 3A. – P. 718-727.

2. **Odenbach, S.** Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications / S. Odenbach // Lecture Notes in Physics. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – 256 p.

3. **Frolov, K.V.** Modern tribology: results and prospects / K.V. Frolov. – M.: Izd-vo LKI, 2008. – 480 p. (In Russian).

4. **Orlov, D.V.** Magnetic fluids in mechanical engineering / D.V. Orlov, Yu.O. Mikhalev, N.K. Myshkin. – M.: Mashinostroenie, 1993. – 272 p. (In Russian).

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 mekhanizmax. – 2010. – № 10. – P. 23-29. (In Russian).

6. **Uhlmann, E.** Application of magnetic fluids in tribotechnical systems / E. Uhlmann // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – V. 252. – P. 336-340.

7. **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).

8. **Fertman, V.E.** Magnetic fluids: a reference guide / V.E. Fertman. – Minsk: Vyshejshaya shkola, 1988. – 184 p.

9. **Ermakov, S.F.** Effect of lubricants and additives on the tribological performance of solids. Part 2. Active friction control / S.F. Ermakov // Journal of Friction and Wear. – 2012. – V. 33. – № 3. – P. 217-223.

10. **Nada, G.S.** Static performance of finite hydrodynamic / G S. Nada, T.A. Osman // Journal Bearings Lubricated by Magnetic Fluids with Couple Stresses. Tribology Letters. – 2007. – V. 27. – № 3. – P. 261-268.
11. **Miszczak, A.** Tribological behavior of ferro-fluid / A. Miszczak // Journal of Friction and Wear. – 2006. – V. 27. – № 3. – P. 330-336. (In Russian).
12. **Bolotov, A.N.** Lubricating oils on the basis of nanoliquids / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2018. – I. 10. – P. 159-168. (In Russian).
13. **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. – № 2. – P. 121-125. (In Russian).
14. **Bolotov, A.N.** A set of equipment for studying the physicochemical properties of nanodispersed magnetic media. Part 2 / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova, D.I. Gorlov // Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detalej tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya. – 2014. – № 7. – P. 85-89. (In Russian).
15. **Bajburtskij, F.S.** Magnetic fluids: production methods and applications. – Rezhim dostupa: [www.url: http://magneticliquid.narod.ru/authority/008.htm](http://magneticliquid.narod.ru/authority/008.htm). – 18.06.2019. (In Russian).
16. **Bolotov, A.N.** Role of magnetic field in friction of surfaces lubricated by magnetic oil / A.N. Bolotov, N.V. Lochagin, Yu.O. Mikhalev // Soviet Journal of Friction and Wear. – 1988. – V. 9. – № 5. – P. 80-86.
17. **Kurapov, P.A.** Lubricating properties fluorine-containing organic additives under condition semi-liquid lubrication / P.A. Kurapov // Journal of Friction and Wear. – 1995. – V. 16. – № 4. – P. 759-765. (In Russian).

Original paper

**LUBRICATION PROPERTIES OF MAGNETIC NANOLIQUIDS
BASED ON CARBOXYLIC ACIDS**

A.N. Bolotov, O.O. Novikova

Tver State Technical University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.555

Abstract: We adduce technological characteristics of synthesis and properties of low-viscous magnetic lubricant nanoliquids with dispersion phase based on diester carboxylic acids. Some physical-chemical and tribological differential characteristic of the diester magnetic lubricant oils are presented. We researched the lubrication properties of the magnetic nanoliquids in various friction conditions and determine their peculiar characteristics. It was analyzed the influence of the series of antiwear additions on the friction.

Keywords: *magnetic lubricant nanoliquid, friction, wear, lubricant, antifriction and antiwear additions.*

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: 15.06.2019; после рецензирования/reviced: 21.07.2019; принята/accepted 15.08.2019.