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**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 10

ТВЕРЬ 2018

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:

www.physchemaspects.ru

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. – Вып. 10. – 708 с.

ISBN 978-5-7609-1395-1

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

Сборник составлен из оригинальных статей 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.

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

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1395-1

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2018

© Тверской государственной
университет, 2018

УДК 621.892

СМАЗОЧНЫЕ МАСЛА НА ОСНОВЕ НАНОЖИДКОСТЕЙ

А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

170026, Тверь, наб. А. Никитина, 22

alnikbltov@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.159

Аннотация: Обоснована целесообразность применения дисперсионной среды на основе диэфиров карбоновых кислот, для получения магнитного смазочного масла нового поколения. Показан нестандартный подход к выбору ПАВ-стабилизаторов коллоидной структуры масел с учетом их диэлектрических свойств и особенностей влияния на трение. Приведены данные предварительного выбора присадок и наполнителей для магнитного масла, которые характеризуются различным механизмом снижения трения.

Ключевые слова: магнитное смазочное масло, трение, изнашивание, смазка, дисперсионная среда, дисперсная фаза, антифрикционные и противоизносные присадки.

1. Введение

Магнитные жидкости, являющиеся гибридными наноматериалами, созданы более тридцати лет назад, но научный и практический интерес к ним остается очень высоким [1-3]. Большое внимание уделяется проблемам применения магнитных жидкостей для смазывания трибосопряжений. В настоящее время традиционные трехкомпонентные магнитные жидкости уже хорошо изучены, и их потенциальные возможности, как функционального материала в значительной мере исчерпаны [4-7]. Так, например, магнитные жидкости триботехнического назначения могут достаточно эффективно использоваться только в магнитожидкостных уплотнениях и для смазывания тихоходных гидродинамических трибоузлов, то есть в тех случаях, когда играют роль объемные свойства жидкостей, а процессы взаимодействия магнитной жидкости с поверхностью не столь важны [8]. Для смазывания трибосопряжений работающих постоянно или кратковременно при граничном режиме трения необходимо создавать специальные магнитные жидкости – магнитные смазочные масла (ММ) [9]. Причем, антифрикционные и противоизносные свойства масел должны быть на уровне свойств лучших традиционных смазочных масел. Таким образом, стало очевидным, что для триботехнических целей нужно использовать не обычные магнитные жидкости, а специально созданные на основе системного подхода магнитные масла с высокими смазочными свойствами и специфическими физико-химическими характеристиками (вязкостью, испаряемостью, температурой застывания и кипения и т.д.). Для тихоходных узлов трения синтезированы хорошие магнитные смазочные масла на основе кремнийорганических жидкостей, но из-за высокой

вязкости (1–10 Па·с) использовать их в высокоскоростных гидродинамических узлах трения нельзя по причине недопустимо высокого фрикционного разогрева. Основная задача данного исследования состояла в разработке магнитных смазочных масел на основе диэфиров карбоновых кислот с высокими магнитными и триботехническими характеристиками, обладающих низкой вязкостью, испаряемостью и способных функционировать в широком температурном диапазоне.

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

Исследования смазочных свойств магнитных масел при высоких контактных давлениях проводились на трехшариковой машине трения МТШ-М [10]. Для удержания магнитного масла на дорожке трения в оправку между шарами вставлены цилиндрические магниты, обращенные полярной поверхностью к плоскости контробразца. Магнитное масло собиралось и удерживалось неоднородным полем около полюса магнита. Для экспериментов были выбраны шаровые образцы диаметром 8 мм, выполненные из стали ШХ-15; цилиндрический контробразец изготавливался из стали ШХ15. Испытания проводили при скорости скольжения 0,24 м/с и начальном давлении на контакте 1,25 ГПа. Триботехнические испытания магнитных масел в области средних давлений проводились по схеме трения диск – палец на машине трения МТП [10]. Приведенные далее свойства масел получены при скорости скольжения 0,32 м/с и давлении на контакте 4,2 МПа. Материалы пары трения Ст.3 – бронза ОСЦ5-5-5. Необходимое для испытаний количество магнитного масла объемом 1–3 см³ наносилось на диск. Под действием магнитных сил масло удерживается в виде половины тора прямо на дорожке трения. Реологические свойства магнитных масел определялись на ротационном вискозиметре в различных поперечных магнитных полях. Для оценки коррозионных свойств масел при циклирующих механических напряжениях использовался оригинальный прибор [11].

3. Выбор состава дисперсионной среды для масел

Исходя из требований, предъявляемых к магнитным маслам для узлов трения, дисперсионная среда, содержание которой доходит до 80 об.%, должна обладать следующими характеристиками: испаряемостью как у вакуумных жидкостей; вязкостью порядка 10⁻² Па·с, что бы вязкость полученного магнитного коллоида была около 0,1 Па·с или ниже; хорошими смазочными свойствами при граничном режиме трения; низкой температурой застывания и высокой температурой кипения; быть устойчивой к окислению в присутствии мелкодисперсного магнетита; обладать стабильностью магнитных и реологических свойств.

По физическим и химическим свойствам наиболее полно указанным требованиям отвечают синтетические жидкости разного химического состава, приведенные в Таблице 1. Результаты триботехнических испытаний свидетельствуют, что для конкретных условий диэфир карбоновой кислоты ДОС (диоктилсебацат) выгодно отличается по своим антифрикционным и противоизносным свойствам. Хорошие антифрикционные характеристики показал также трикрезилфосфат (ТКФ), однако продукты окисления этого масла (фосфорная кислота, неполные эфиры фосфорной кислоты) образующиеся при термомеханических воздействиях, проявляют сильную коррозионную активность, что ограничивает применение фосфатов в качестве основы смазочных материалов.

Таблица 1. Смазочные и физико-химические показатели дисперсионных сред магнитных масел (f – коэффициент трения, I_h – интенсивность линейного износа, d – диаметр пятна износа)

Жидкости	Машина трения МТП		Машина трения МТШ		Температура застывания, °С	Давление пара (при 20 °С), Па	Вязкость (при 20 °С), Па·с
	f	$I_h \cdot 10^9$	f	d , мм			
ДОС	0,07	0,6	0,17	0,40	-60	10^{-4}	0,02
ДБС	0,08	2,3	0,17	0,42	-12	10^{-3}	0,01
ДОФ	0,18	3,1	0,18	0,54	-50	10^{-3}	0,08
ФМ-6	0,15	5,9	0,30	1,20	-115	10^{-4}	0,04
ТКФ	0,10	0,7	-	-	-36	10^{-3}	0,11
ПОМ	0,10	6,1	0,10	0,48	-135	10^{-7}	0,03
ВМ-4	0,10	0,5	0,13	0,42	-15	10^{-3}	0,07

В Таблице 1 приведены также результаты испытаний углеводородного вакуумного масла ВМ-4, которые позволяют сравнить его смазочную способность со свойствами синтетических жидкостей. Почти все синтетические жидкости, кроме жидкостей ТКФ и ДОС, значительно уступают по фрикционным показателям углеводородному маслу при умеренных контактных давлениях, в то время как при высоких давлениях их свойства сравнимы. На основе вакуумного масла ВМ-4 создано магнитное масло с высокой намагниченностью (около 30 кА/м), низкой вязкостью (около 0,1 Па·с), но оно достаточно интенсивно испаряется, недостаточно хорошо смазывает металлические поверхности и застывает уже при -15°C .

Олигометилфенилсилоксановая жидкость ФМ-6 имеет приемлемые физико-химические характеристики, но очень плохо смазывает трущиеся поверхности. Триботехнические характеристики полученных нами магнитных масел на основе олигометилфенилсилоксана ФМ-6 еще более низкие, чем у основы, а также ему присуща склонность к полимеризации в

условиях трения даже при нормальной температуре. Кроме того, при намагниченности этого масла равной 35 кА/м вязкость достигает 1,7 Па·с, что на порядок выше допустимого значения.

Смазочные свойства перфторэфира ПОМ далеко не лучшие, но эти свойства у магнитного масла на его основе становятся уникально высокими [6]. Однако для широкого применения магнитное масло на основе ПОМ не подходит из-за высокой стоимости.

Окончательно, на основе сравнительного анализа основных эксплуатационных свойств нефтяных и синтетических жидкостей, а также фрикционных испытаний можно сделать вывод, что наиболее полно всем требованиям, предъявляемым к дисперсионной среде магнитных масел, отвечают диэфиры карбоновых кислот. Важным свойством диэфиров карбоновых кислот является также хорошая совместимость с поверхностно-активными (ПАВ) веществами различных классов, что позволяет расширить возможности по подбору стабилизатора магнитных частиц.

Для получения магнитных масел выбраны следующие диэфиры (см. Таблицу 1): диоктилсебацат (ДОС), дибутилсебацат (ДБС), диоктилфталат (ДОФ). Жидкость ДОС выделяется наиболее низкими значениями давления насыщенных паров и температуры застывания (см. Таблицу 1). У жидкостей ДОС и ДБС вязкость приблизительно одинаковая, а у жидкости ДОФ в несколько раз выше.

4. Дисперсная магнитная фаза

Для синтеза магнитных масел использовался высокодисперсный магнетит, полученный хорошо изученным методом химической конденсации. Частицы магнетита имели размер от 5 до 17 нм при среднем размере около 10 нм; намагниченность насыщения составляла около 430 кА/м. Поверхность частиц обладала повышенной адсорбционной активностью, что было важно для обеспечения их коллоидной стабилизации. Микротвердость частиц магнетита около 5 ГПа. Дисперсные частицы и образованные из них агломераты размерами до 10^{-7} – 10^{-6} м при тяжелых режимах трения могут вызывать разрушение смазанных магнитным маслом поверхностей посредством микрорезания и малоциклового пластического передеформирования. Поэтому, для снижения абразивной составляющей результирующего износа при граничной смазке следует выбирать материалы трения с более высокой, чем у магнетита твердостью.

5. Выбор ПАВ-стабилизатора масел

Этот этап в процессе создания магнитных масел особенно важен потому, что коллоидная структура масел может быть нарушена в

результате термомеханических воздействий в зоне трения. Для стабилизации коллоидных частиц применяют поверхностно-активные вещества, которые адсорбируются на поверхности магнетита и предотвращают агломерацию магнитных частиц, а также обеспечивают седиментационную стабильность коллоида в гравитационных и магнитных полях. Некоторые общие рекомендации по предварительному выбору ПАВ-стабилизатора, которые касаются размеров и конфигурации молекул, предпочтительной ориентации их на поверхности в адсорбированном состоянии, растворимости и относительной концентрации приведены в [12]. На практике, для окончательного выбора ПАВ-стабилизатора нельзя обойтись без экспериментального анализа устойчивости опытных коллоидов.

Наиболее распространенными стабилизаторами являются жирные кислоты (олеиновая, стеариновая и др.). Особенности структуры молекулы: оптимальное соотношение между посадочной площадкой и длиной углеводородного радикала, а также присутствие адсорбционноактивной концевой группы $COOH$, способной к хемосорбции, – определяют высокое стабилизирующее действие этих кислот. Магнитные масла, стабилизированные жирными кислотами, являются наиболее устойчивыми в неоднородных магнитных полях и в поле сил тяжести. В то же время, жирные кислоты в определенных условиях могут облегчать разрушение поверхностей трения согласно эффекту Ребиндера и вызывать их коррозию (см. Таблицу 2). Поэтому, для опытов были выбраны две ненасыщенные жирные кислоты – олеиновая (ОК) и рицинолевая (РК). Наряду с этим, изучалась стабилизирующая способность алкидной производной олеиновой кислоты (МСДА), олигоэфира на основе этилена с фосфорсодержащей полярной группой (Алфенокс) и олигоэфира ОЭ-3 синтезированного непосредственно на поверхности магнитных частиц.

Для экспресс-оценки стабилизирующей способности ПАВ полученные магнитные коллоиды испытывали на стабильность в поле аналогичном гравитационному. Фиксированный объем магнитного масла 40 мл загружали в центрифугу и выдерживали в течение 2 часов при центробежном ускорении около $5600g$. По окончании контролировали отделение дисперсионной среды и фиксировали падение намагниченности из-за перехода магнетита в осадок. Учитывая, что намагниченность коллоида линейно зависит от концентрации дисперсных частиц, количественную оценку стабильности полученных коллоидов проводили по относительному изменению намагниченности в поле центробежных сил. Результаты испытаний магнитной жидкости на основе ДОС представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Коллоидная стабильность магнитных жидкостей и смазочная способность растворов ПАВ в диоктилсебацinate (ε_p – диэлектрическая проницаемость ПАВ, $\Delta J_s / J_s$ – относительное изменение намагниченности J_s коллоида, ΔV – объем отделившейся основы)

ПАВ-стабилизатор	Магнитный коллоид			Машина трения МТП (раствор ПАВ в ДОС)	
	ε_p	$\Delta J_s / J_s, \%$	$\Delta V, \text{мл}$	f	$I_h \cdot 10^9$
ОК	2,43	100	>30	0,13	0,95
МСДА	3,40	57	10	0,15	0,70
ОЭ-3	4,95	4,8	0	0,14	0,42
РК	4,91	5,6	0	0,14	0,31
Альфонокс	6,30	69	11	0,15	0,60

Из результатов испытаний, представленных в Таблице 2, вытекает, что относительное уменьшение намагниченности и объем отделившейся основы из-за необратимых седиментационных процессов хорошо коррелируют с величиной диэлектрической проницаемости дисперсионной среды. Максимальная седиментационная устойчивость достигается при использовании ПАВ с диэлектрической проницаемостью близкой к диэлектрической проницаемости несущей среды. Снижение намагниченности в результате седиментации частиц может зависеть и от вязкости дисперсионной среды. В нашем случае, оценочные расчеты показывают, что сила Стокса, препятствующая перераспределению частиц много меньше центробежной силы и поэтому различную вязкость жидкостей в первом приближении можно не принимать во внимание.

Приведенные данные показывают, что диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды должна незначительно отличаться от аналогичной характеристики ПАВ-стабилизатора. В противном случае, процессы десорбции молекул ПАВ с магнитных частиц способствуют снижению качества защитных адсорбционных слоев, и коллоидная устойчивость ухудшается. С практической точки зрения, указанная закономерность позволяет априорно ограничить количество допустимых вариантов ПАВ-стабилизаторов с учетом диэлектрических свойств дисперсионной среды, особенно если она содержит различные функциональные присадки. Из Таблицы 2 видно, что наиболее устойчивые магнитные коллоиды на основе диэфиров можно синтезировать при использовании для стабилизации дисперсных частиц рицинолевой кислоты и олигоэфира ОЭ-3.

Исследование состава дисперсионной среды методом ИК-спектроскопии, а также отделенной от магнитной фазы жидкости-носителя на рефрактометре показали, что при правильном расчете количества стабилизатора и при тщательной пептизации, содержание ПАВ в

свободном состоянии составляет не более 1%. Исходя из этого, влияние стабилизатора на фрикционные характеристики дисперсионной среды изучали на однопроцентных модельных растворах ПАВ в ДОС. Сравнение смазочных свойств растворов ПАВ (см. Таблицу 2) свидетельствует о положительном влиянии РК и ОЭ-3 на противоизносные свойства.

На основании проведенных опытов можно сделать вывод, что наиболее подходящими для стабилизации магнитных частиц являются ненасыщенные жирная кислота (РК) и олигоэфир ОЭ-3. Поэтому дальнейшие работы по созданию технологии получения устойчивых магнитных масел велись с использованием стабилизаторов РК и ОЭ-3.

6. Выбор присадок и наполнителей к магнитным маслам

Для улучшения смазочных свойств магнитных масел в их состав вводились специальные антифрикционные, противоизносные и противозадирные присадки и наполнители, содержание которых варьировалось от 1 до 15 масс. %. Изучалось влияние на трение следующих хорошо растворимых в дисперсионной среде присадок: хлорсодержащего бициклический эфира 3Н2ТЭ, фторированных аминов ЭО-1 и М-196, хлорсодержащего фторированного амина ЭО-2, металлоплакирующего медьсодержащего соединения МКФ-18, тризилфосфата (ТКФ), металлоорганической ремонтно-восстановительной присадки СУРМ-ВК и органомолибденового модификатора трения Моливан Л. Одной из отличительных особенностей магнитных масел от немагнитных является то, что оптимальное содержание присадки, снижающей трение и износ в них значительно выше. В традиционных смазочных маслах содержание присадки редко превышает 5 масс. %, в то время, как в магнитных маслах может достигать до 15–20 масс. %. Однако это не означает, что приблизительно столько же присадки находится в свободном состоянии и участвует в образовании граничных слоев на поверхностях трения. Например, исследовалось содержание в свободном состоянии присадки 3Н2ТЭ в ММ1-ДОС. Жидкая фаза масла была выделена путем сепарации магнитных частиц в высокоградиентном магнитном поле. Анализ химического состава жидкой фазы спектральным методом показал содержание в ней около 4 масс. % присадки, хотя в дисперсионной среде растворялось 10 масс. %. По-видимому, часть молекул присадки участвует в образовании полимолекулярных адсорбционных слоев на поверхности магнитных частиц.

Присадки, снижающие трение и износ эффективны лишь в определенном диапазоне значений параметров трения, таких как скорость скольжения, давление на контакте и температура. Наполнители на основе мелкодисперсных пластичных металлов работоспособны в более широком диапазоне, но они имеют весьма низкую коллоидную устойчивость, а

также могут значительно увеличить вязкость магнитных масел. С учетом этого был разработан наполнитель на основе мелкодисперсной меди.

Получение порошка осуществлялось посредством термического разложения медьорганического соединения. При добавлении сульфата меди к глицерину и последующем нагреве до 85°C при постоянном перемешивании, образуется соединение производное глицерина $C_2H_5(OH)O_2Cu$ в виде вязкого зеленого раствора. Далее производится разбавление и нагрев до температуры 120°C. В результате термического распада образуется углеводородный остаток и мелкодисперсная металлическая медь. После окончания разложения полученный медный осадок промывается и пептизируется по стандартной методике для получения устойчивой коллоидной системы. В качестве вещества-стабилизатора использовалась хлорсодержащая противозадирная присадка 3Н2ТЭ. Полученные медные частицы имели дендритную форму, дисперсность частиц 0,01–0,1 мкм.

Таблица 3. Смазочные свойства растворов дисперсионных сред с ПАВ-стабилизаторами и присадками

Смазочная композиция	Машина трения МТП		Смазочная композиция	Машина трения МТП	
	f	$I_h \cdot 10^{-9}$		f	$I_h \cdot 10^{-9}$
1. ДОС	0,07	1,2	2. ДБС	0,08	2,3
+5 масс. % 3Н2ТЭ	0,12	1,2	+10 масс. % ТКФ	0,09	1,5
+1 масс. % МКФ-18	0,07	0,5	+5 масс. % М-196	0,02	0,3
+3 масс. % Cu	0,08	0,7			
+5 масс. % Протект-100	0,09	1,1			

Кроме того, изучалось влияние на процессы трения наполнителя Протект-100 содержащего дисперсные частицы тефлона. Смазочные свойства растворов дисперсионных сред с присадками и наполнителями определенные на машине трения МТП приведены в Таблице 3 (исследуемые жидкости ДОС, указанные в Таблице 2 и 3 взяты из разных партий). Наиболее эффективно улучшает смазочные свойства дисперсионных сред фторсодержащая присадка М-196. Хорошие свойства показали растворы, содержащие присадку ТКФ, за счет образования на поверхности трения защитных пленок содержащих фосфиды металлов, а также присадка МКФ-18, содержащая олеат меди. Незначительное улучшение противоизносных наблюдалось после введения в ДОС дисперсной меди и тефлона.

7. Заключение

Таким образом, показано, что для создания перспективных магнитных смазочных масел с хорошими смазочными свойствами, невысокими испаряемостью и вязкостью хорошо подходят в качестве

дисперсионной среды некоторые диэфиры карбоновых кислот. Предложен и обоснован выбор ПАВ для сохранения коллоидной стабильности магнитных масел в условиях граничного трения. По результатам триботехнических испытаний проведен предварительный отбор присадок и наполнителей для улучшения смазочных свойств масел, которые хорошо совместимы с дисперсионной средой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 17-48-690826, № 17-08-00614).

Библиографический список:

1. **Odenbach, S.** Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications / S. Odenbach // Lecture Notes in Physics. – Springer-Verlag, 2002. – 253 p.
2. **Болотов, А.Н.** Разработка модифицированной технологии получения наноструктурного магнитного масла / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2016. – Вып. 8. – С. 69-75.
3. **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.
4. **Ochoński W.** Sliding bearings lubricated with magnetic fluids / W. Ochoński // Industrial Lubrication and Tribology. – 2007. – V. 59. – № 6. – P. 252-265.
5. **Wei, H.** Study on the synthesis and tribological property of Fe_2O_3 based magnetic fluids / H. Wei, X. Wang, G. Ma, C. Shen // Tribology Letters. – 2009. – V. 33. – № 3. – P. 187-192.
6. **Мишак, А.** Трибологические свойства феррожидкости / А. Мишак // Трение и износ. – 2006. – Т. 27. – № 3. – С. 330-336.
7. **Nada, G.S.** Static Performance of Finite Hydrodynamic Journal Bearings Lubricated by Magnetic Fluids with Couple Stresses / G.S. Nada, T.A. Osman // Tribology Letters. – 2007. – V. 27. – № 3. – P. 261-268.
8. **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. – 272 с.
9. **Курапов, П.А.** Трение и работоспособность сопряжений в условиях использования микрогетерогенных смазочных композиций: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / Павел Анатольевич Курапов. – Тверь: ТвГТУ, 2011. – 39 с.
10. **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.
11. **Болотов, А.Н.** Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография / А.Н. Болотов, В.Л. Хренов. – Тверь: ТвГТУ, 2008. – 124 с.
12. **Фертман, В.Е.** Магнитные жидкости: справочное пособие / В.Е. Фертман. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 184 с.

References:

1. **Odenbach, S.** Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications / S. Odenbach // Lecture Notes in Physics. – Springer-Verlag, 2002. – 253 p.
2. **Bolotov, A.N.** Razrabotka modifitsirovannoj tekhnologii polucheniya nanostrukturnogo

- magnitnogo masla / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. – 2016. – I. 8. – P. 69-75.
3. **Bolotov, A.N.** Magnitnye masla tribotekhnicheskogo naznacheniya / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. – 2009. – I. 1. – P. 5-9.
4. **Ochoński W.** Sliding bearings lubricated with magnetic fluids / W. Ochoński // Industrial Lubrication and Tribology. – 2007. – V. 59. – № 6. – P. 252-265.
5. **Wei, H.** Study on the synthesis and tribological property of Fe_2O_3 based magnetic fluids / H. Wei, X. Wang, G. Ma, C. Shen // Tribology Letters. – 2009. – V. 33. – № 3. – P. 187-192.
6. **Mishchak, A.** Tribologicheskie svojstva ferrozhidkosti / A. Mishchak // Trenie i iznos. – 2006. – V. 27. – no. 3. – P. 330-336.
7. **Nada, G.S.** Static Performance of Finite Hydrodynamic Journal Bearings Lubricated by Magnetic Fluids with Couple Stresses / G.S. Nada, T.A. Osman // Tribology Letters. – 2007. – V. 27. – № 3. – P. 261-268.
8. **Orlov, D.V.** Magnitnye zhidkosti v mashinostroenii / D.V. Orlov, YU.O. Mihalev i dr.; pod obshch. red. D.V. Orlova, V.V. Podgorkova. – M.: Mashinostroenie, 1993. – 272 p.
9. **Kurapov, P.A.** Trenie i rabotosposobnost' sopryazhenij v usloviyah ispol'zovaniya mikroeterogennykh smazochnykh kompozicij: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk: 05.02.04 / Pavel Anatol'evich Kurapov. – Tver': TvGTU, 2011. – 39 p.
10. **Bolotov, A.N.** Issledovanie tribotekhnicheskikh svojstv nanostrukturnykh magnitnykh smazochnykh masel s razlichnymi dispersionnymi sredami / A.N. Bolotov, O.O. Novikova, V.V. Novikov // Trenie i iznos. – 2017. – V. 38. – no. 2. – P. 107-113.
11. **Bolotov, A.N.** Tribotekhnika magnitopassivnykh opor skol'zheniya: monografiya / A.N. Bolotov, V.L. Hrenov. – Tver': TvGTU, 2008. – 124 p.
12. Fertman, V.E. Magnitnye zhidkosti: spravochnoe posobie / V.E. Fertman. – Minsk: Vyshejschaya shkola, 1988. – 184 p.

LUBRICATING OILS ON THE BASIS OF NANOLIQUIDS

A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova

Tver State Technical University

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.159

Abstract: We established applicability of dispersed medium based on diesters of carbonic acids for production the low-viscosity magnetic oil of new generation. It was shown unusual approach to select surfactant-stabilizer for colloidal structure of oils considering their dielectric properties and friction effects. It was submitted the preselection findings of the additions and fillers for magnetic oil which are characterized by the different mechanism of reducing friction.

Keywords: *magnetic lubricating oil, friction, wear, lubricant, dispersed medium, dispersed phase, antifriction and wearproof additives.*

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

Новиков Владислав Викторович – к.т.н., доцент, доцент кафедры 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, Academic Secretary of the Academic Council, Head of the Applied Physics Department, Tver State Technical University

Vladislav V. Novikov – Ph. D., Docent of the Applied Physics Department, Tver State Technical University

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