

## **СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА НАНОДИСПЕРСНЫХ МАГНИТНЫХ МАСЕЛ НА ОСНОВЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ**

А.Н. Болотов, Л.Е. Афанасьева, В.В. Мешков  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»  
170026, Россия, Тверь, наб. А. Никитина, 22  
*alnikbltov@rambler.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.679

**Аннотация:** Представлены результаты исследований свойств магнитных смазочных масел, синтезированных на основе фторорганических жидкостей и триэтанола. Смазочные свойства масел определялись при граничном режиме трения в условиях средних и высоких контактных давлений. Показано, что магнитные масла на основе перфторполиэфира имеют более высокие смазочные свойства чем масла на основе других жидкостей, особенно в области средних нагрузок. Противоизносные свойства и агрегативная устойчивость этого магнитного масла начинают резко ухудшаться при температуре, превышающей 150°C. Применение в качестве присадки к магнитному маслу перфторполиэфирной жидкости, позволило улучшить противоизносные свойства магнитного масла при средних и высоких контактных давлениях. Смазочные свойства магнитных масел на основе триэтанолamina примерно такие же, как у магнитных масел на основе силиконов, но несколько хуже, чем у традиционных немагнитных масел. По трибологическим свойствам исследованные магнитные масла сравнимы с традиционным пластичным и жидким смазочными материалами. Наличие у магнитных масел аномальных для жидкостей магнитных свойств значительно расширяет область их эффективного применения.

*Ключевые слова:* магнитное смазочное масло, фторорганические жидкости, триэтанолamin, нанодисперсные частицы, трение, изнашивание.

### **1. Введение**

Жидкие среды с высокой намагниченностью – магнитные жидкости давно привлекают ученых, создающих новые материалы, предназначенные для перспективных технических устройств, функционирующих в машинах и механизмах в различных отраслях промышленности. Особое внимание уделяется разработке магнитных жидкостей с хорошими смазочными свойствами, которые называют магнитными нанодисперсными смазочными маслами [1-9]. Основное достоинство таких магнитных масел заключается в том, что за счет самоорганизации они могут поступать в зону трения и вытеснять оттуда отработавшее масло под влиянием неоднородных термомагнитных полей. Поэтому, для смазки магнитожидкостных узлов трения нет необходимости в использовании устройств для непрерывной или дискретной подачи смазочного материала. Это позволяет создавать простые по конструкции узлы трения (подшипники скольжения и качения, уплотнения, зубчатые передачи и т.д.) с высокой надежностью и эффективностью. Некоторые примеры практической реализации подшипников скольжения со смазкой магнитным

маслом приведены в монографии [10].

Для триботехнических целей требуются не традиционные неадаптированные для трения 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.). Такие смазочные масла были созданы на основе силоксановых жидкостей и диэфиров карбоновых кислот. В работах [2, 5] описаны технологические особенности получения магнитных масел на основе указанных жидкостей и приведены основные направления повышения их антифрикционных и противоизносных свойств. Показано, что смазочные свойства изученных магнитных масел соответствуют уровню свойств традиционных смазочных немагнитных масел для аналогичных условий трения [2].

Однако еще остаются технические жидкости с уникальными физико-химическими характеристиками которые можно использовать в качестве дисперсионной среды для получения новых магнитных смазочных масел. Содержание дисперсионной среды в магнитном масле может превышать 70–80 об. %, поэтому от ее свойств в основном зависят характеристики магнитного смазочного масла [11]. Представляет интерес изучить смазочные свойства магнитных масел на основе фторорганических соединений и триэтанолamina. Фторорганические жидкости имеют очень низкую температуру застывания (ниже  $-120^{\circ}\text{C}$ ), термически устойчивы до  $+300^{\circ}\text{C}$ , обладают стойкостью к радиации, что расширяет возможность использования их в качестве смазок [12]. Триэтанолamin – вязкая гигроскопичная жидкость, неограниченно смешивается с водой, хорошо растворим в этаноле, бензоле, хлороформе, плохо – в предельных углеводородах. Растворы, содержащие триэтанолamin показали хорошие смазочные свойства и получили распространение для снижения износа режущего инструмента, используемого при металлообработке и для повышения надежности узлов трения, эксплуатируемых во взрывоопасных условиях [13]. Получить магнитное масло на основе триэтанолamina можно без применения поверхностно-активных веществ для стабилизации коллоида.

Основная задача данного исследования состояла в исследовании физико-химических и триботехнических свойств новых нетрадиционных магнитных смазочных материалов на основе фторорганических соединений и триэтанолamina. Исследования магнитных масел проводились при граничном режиме трения, поскольку именно этот режим в основном лимитирует долговечность узлов трения.

## 2. Материалы и методы исследований

Для выполнения исследований были выбраны магнитные наножидкости на основе фторорганических соединений и триэтанолamina [1]. В Таблице 1. приведены некоторые физико-химические свойства используемых фторорганических жидкостей.

Таблица 1. Свойства фторорганических жидкостей

Марка жидкости	ПОМ-5	ПФТ-100	ПЭФ-240	ФЭН
Состав	Смесь простых перфторполиэфиров	Перфтортриазин	$R_fO(CF_2CF_2O)_nRF$ и $CF_3$	Смесью фторированных олигомеров полиэфиров
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,8÷1,9	–	1,9÷1,92	1,85÷1,9
Кинематическая вязкость при 20°C, 10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с	15÷20	Менее 600	150÷200	Менее 170
Температура застывания, °C	-135	-50	-40	-120
Температура разложения, °C	≥200	≥350	≥300	≥250
Применение	Дисперсная среда пластичных смазок	Присадка к маслам	Основа смазок, работающих в агрессивных средах	Основа низко температурных смазок

Из возможных вариантов фторорганических магнитных масел удалось синтезировать только два масла ММ-ПОМ1 и ММ-ПОМ2 с хорошей седиментационной и агрегативной устойчивостью, которые содержали в качестве дисперсионной среды фторорганическое соединение перфторполиэфир ПОМ-5 и были стабилизированы различными амидами перфтороксаалкилкарбоновых кислот – соответственно марки 19F и 49F. Технологические особенности синтеза магнитных масел приведены в [14, 15]. Масло ММ-ПОМ1 имело намагниченность насыщения 18,3 кА/м, вязкость 0,8 Па·с, а у масла ММ-ПОМ2 эти характеристики были соответственно равны 23,8 кА/м и 0,9 Па·с. Также было синтезировано масло ММ-ПЭФ на основе ПЭФ-240 с намагниченностью 32 кА/м и вязкостью 4 Па·с, но это масло было менее седиментационно устойчиво.

Для получения магнитных наномасел использовался высокодисперсный магнетит, полученный по методу Элмора [15]. Размер частиц магнетита изменялся от 5 до 17 нм при их среднем размере 8 нм; намагниченность насыщения частиц около 430 кА/м; микротвердость наночастиц магнетита около 5 ГПа (это следует учитывать при выборе материалов поверхностей трения).

Еще одна магнитная смазочная жидкость была синтезирована на основе триэтанолamina. Химическая формула триэтанолamina (ТЭА) –

$(HO-CH_2CH_2)_3N$ . Это соединение ряда этаноламинов нетоксично, имеет вязкость около 0,3 Па·с (при 20°C), достаточно высокие температуры кипения и вспышки 360°C и 179°C соответственно и испаряется приблизительно с такой же скоростью, как вязкие нефтяные масла. Магнитное масло марки ММ-ТЭА на основе триэтаноламина обычно изготавливается с намагниченностью 30÷35 кА/м, которой соответствует вязкость 1÷1,5 Па·с. При этой намагниченности у магнитного масла наряду с вязкостными начинают заметно проявляться пластические свойства. Характерной особенностью масла ММ-ТЭА является то, что оно содержит лишь две компоненты – жидкость ТЭА и частицы магнетита (диаметром около 8 нм). Роль стабилизатора коллоидной структуры выполняет дисперсионная среда.

Испытания магнитного масла проводились на установках, в которых трение происходило между шаром и плоскостью (аббревиатура установки МТШ-М) при контактном давлении 1,25 ГПа (начальное давление) и между торцом цилиндра и плоскостью (аббревиатура установки МТП) при контактном давлении 4,2 МПа. Скорость скольжения подвижных образцов составляла 0,5 и 0,24 м/с соответственно. Материалы трущихся поверхностей: шаровой образец – сталь ШХ15, контртело – сталь 20Х, цилиндрический образец – сталь Ст3, контртело – бронза марки БрОСЦ5–5–5. Более подробно с методикой триботехнических испытаний магнитных масел и с конструкцией опытных установок можно ознакомиться в [12, 16, 17].

### **3. Результаты экспериментальных исследований**

#### **3.1. Масла на основе фторорганических соединений**

Триботехнические испытания показали, что фторорганическая жидкость ПФТ-100 обладает очень хорошими смазочными свойствами при умеренных контактных давлениях, однако уступает жидкости ПЭФ-240 и ПОМ при высоких давлениях (см. Таблицу 2). Жидкость ФЭН неплохо снижает силу трения, но имеет плохие противоизносные свойства во всем диапазоне контактных давлений.

Для улучшения смазочных свойств магнитных наномасел в их состав вводились специальные антифрикционные, противоизносные и противозадирные присадки различных химических классов, содержание которых варьировалось от 1 до 20 масс.%. При составлении смазочных композиций на основе магнитных наномасел необходимым условием является, во-первых, сохранение агрегативной и седиментационной устойчивости магнитного коллоида; во-вторых, хорошая растворимость присадки в жидкости-носителе, так как магнитная эмульсия быстро расслаивается в магнитном поле.

Всего исследовалось двенадцать различных присадок, включая присадки, содержащие фтор – ЭО-1, ЭО-2, М165, Ф-56. Из всех опробованных присадок растворяется в дисперсионной среде только одна ЭО-2 в жидкости ПФТ-100. Это обстоятельство существенно осложняет задачу улучшения смазочных свойств фторированных магнитных масел.

Таблица 2. Свойства магнитных дисперсионных сред и магнитных масел при установившейся температуре на контакте ( $f$  – коэффициент трения;  $I_h$  – линейная интенсивность изнашивания;  $d$  – диаметр пятна износа).

Смазочная композиция	Машина трения			
	МТП		МТШ-М	
	$f$	$I_h, 10^{-9}$	$f$	$d, \text{мм}$
ПФТ-100	0,07	0,05	0,17	0,55
ПЭФ-240	0,14	3,7	0,18	0,42
ПОМ	0,10	6,1	0,10	0,48
ФЭН	0,07	20,0	0,10	0,57
ПЭФ-240+10 масс.% ПФТ-100	0,10	0,60	0,18	0,56
ПОМ +10 масс.% ПФТ-100			0,07	0,50
ПФТ-100 + 10 масс.% ЭО-2	0,07	0,03	0,15	0,46
ПОМ +10 масс.% 49F	0,11	3,6	0,14	0,46
ММ-ПЭФ	0,04	1,2		
ММ-ПОМ1	0,03	0,85	0,08	0,38
ММ-ПОМ2	0,06	1,25	0,05	0,62
ММ-ПОМ2+10 масс.% ПФТ-100	0,05	0,6	0,07	0,39
ТЭА	0,11	0,7	0,10	0,48
ММ-ТЭА(1)	0,08	0,75	0,11	0,50
ММ-ТЭА(2)	0,11	4,2	0,12	0,58
ММ-ДОС	0,16	0,65	0,17	0,38
ММ-ДОС+ 10 масс.% ЭО-1	0,08	0,48	0,12	0,32
ММ-ПЭС	0,13	4,5	0,18	0,69
ТМ-5-18	0,07	0,4	0,15	0,35
ВМ-4	0,10	0,50	0,12	0,40
ОКБ-122-7	0,12	≈15	0,13	0,62

В то же время известно, что введение триазинсодержащих соединений, к которым относится жидкость ПФТ, в перфторэфиры повышает термоокислительную устойчивость этих жидкостей. Кроме того, наличие трех атомов азота в триазиновом кольце сообщает высокую адсорбционную активность и пассивирующие свойства соединению по отношению к металлам (особенно к железу и меди). Поэтому представляется целесообразным добавлять жидкости типа ПФТ в жидкости ПЭФ-240 и ПОМ в качестве многофункциональной присадки. Чистая жидкость ПФТ-100 имеет уникально высокие смазочные свойства при средних контактных давлениях, но по мере повышения давления эти

свойства ухудшаются, т.е. при высоких контактных давлениях смазочный слой начинает разрушаться под действием сдвиговых напряжений. Жидкость ФЭН плохо защищает поверхности от износа.

Из Таблицы 2 видно, что введение ПФТ-100 в жидкости ПЭФ-240 снижает трение и износ при средних нагрузках и практически не влияет на трибосвойства при высоких контактных давлениях. Добавление в жидкость ПОМ в качестве присадки 10 масс.% ПФТ-100 приводит к небольшому улучшению антифрикционных свойств смазочной композиции. Присадка ЭО-2 улучшает смазочные свойства ПФТ-100, но незначительно. Добавление в жидкость ПОМ фторорганического ПАВ 49F (стабилизатор коллоидной структуры магнитных масел) позволяет несколько снизить сдвиговые напряжения на контакте.

Также, согласно данным Таблицы 2, магнитное масло ММ-ПОМ1 по смазочным свойствам превосходит свойства дисперсионной среды ПОМ, на основе которой оно было получено.

Магнитное масло ММ-ПОМ2 значительно хуже снижает износ, чем ММ-ПОМ1. Основной причиной может являться некоторый избыток ПАВ стабилизатора, содержащийся в свободном состоянии в масле, который при граничном режиме смазки ведет к повышению износа. В пользу приведённого предположения свидетельствует тот факт, что добавка к дисперсионной среде 3% ПАВ марки 19F, применяемого для стабилизации коллоида, ведет к увеличению пятна износа приблизительно в 1,5 раза при 20°C (см. рис. 1). Поэтому, при получении магнитных масел на основе фторорганических соединений для высоконагруженных узлов трения является целесообразным контроль кислотного числа.

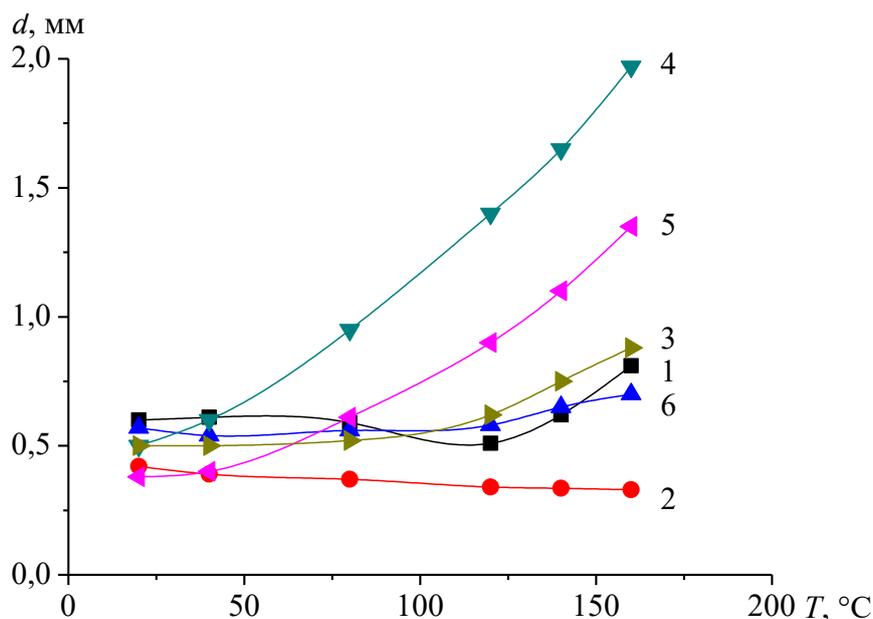


Рис. 1. Зависимости диаметра пятна износа от температуры: 1 – ММ-ПОМ2; 2 – ПОМ; 3 – ПОМ+3% 49F; 4 – ММ-ТЭА; 5 – ТЭА; 6 – ММ-ПЭС.

Смазочные свойства масла ММ-ПОМ1 в начале работы в узле трения несколько превышают свойствам масла ММ-ПОМ2, но через 15-20 часов масло загустевает и перестаёт подаваться магнитными силами на дорожку трения.

Важным свойством масел является стабильность смазочных свойств в широком диапазоне температур. На машине трения МТШ-М исследовалось влияние температуры на коэффициент трения и износ материала ШХ-15 в диапазоне от 20 до 160°C (объемная температура). Смазывание осуществлялось магнитным маслом ММ-ПОМ2 и его дисперсионной средой. Полученные зависимости представлены на рис. 2. Из них следует, что противоизносные свойства дисперсионной среды (жидкость ПОМ) практически не зависят от температуры в исследованном диапазоне, в то время как аналогичная зависимость для магнитного масла носит экстремальный характер. Предельной температурой, при которой целесообразно использование магнитного масла в качестве смазочного масла высоконагруженных узлов является температура ~150°C. Характер температурной зависимости силы трения для магнитного масла примерно соответствует аналогичным зависимостям для дисперсионной среды.

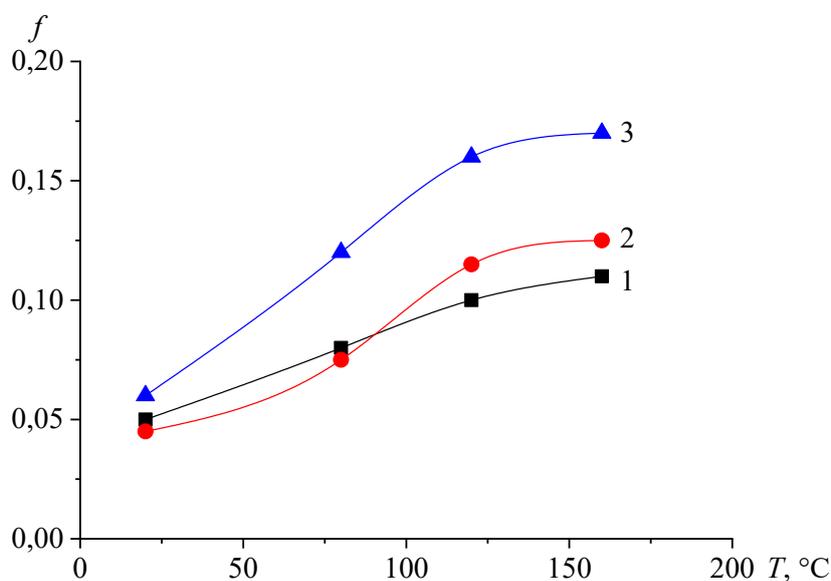


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения от температуры: 1–ММ-ПОМ2; 2–ПОМ; 3–ПОМ+3% 49F.

Изучалось также влияние скорости скольжения на коэффициент трения для магнитного масла ММ-ПОМ2. Результаты экспериментов представлены на рис. 3. Нисходящая на графике ветвь объясняется тем, что при увеличении скорости наряду с граничным режимом трения на все больших участках контакта возникает эластогидродинамический (ЭГД) режим трения. Восходящую ветвь можно было бы объяснить влиянием

разогрева смазки в межконтактном зазоре, но это мало вероятно, так как коэффициент взаимного перекрытия трущихся поверхностей близок к нулю и разогрев поверхностей не превышает приблизительно 50°C. Более вероятно, что при увеличении скорости скольжения все на большей части поверхности не успевает регенерировать граничный адсорбционный слой.

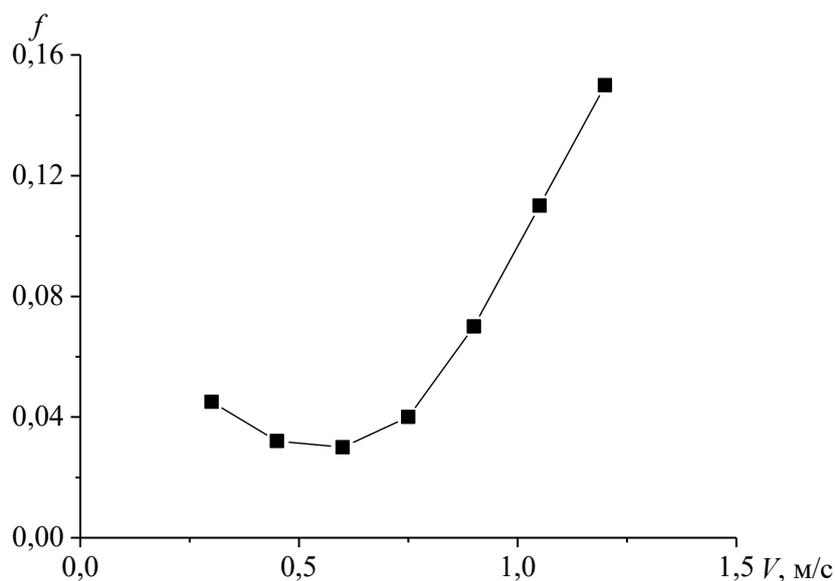


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения при испытании магнитного масла ММ-ПОМ2.

В целом, магнитное масло ММ-ПОМ не уступает по смазочным характеристикам одному из лучших магнитных масел ММ-ДОС на основе диоктилсебацината, даже с присадкой фторалифатического амина ЭО-1, но в то же время у него лучше характеристики, чем у магнитного масла на основе полиэтилсилоксана ММ-ПЭС (см. Таблицу 2).

В Таблице 2 приведены смазочные свойства традиционных немагнитных смазочных материалов – трансмиссионного масла ТМ-5-18, вакуумного масла ВМ-4. По противоизносным свойствам магнитное масло ММ-ПОМ1 не уступает известному углеводному немагнитным маслу, а по антифрикционным свойствам превосходит во всем исследованном диапазоне контактных давлений.

Магнитные масла на основе ПОМ (ММ-ПОМ1,2), по своим реологическим, низкотемпературным и коллоидным свойствам, по испаряемости и невосприимчивости к окружающей среде, очень близко соответствуют пластичным смазочным материалам с дисперсионной средой из полиэтилсилоксана. Среди пластичных смазок, содержащих полиэтилсилоксан одной из лучших по трибосвойствам признана смазка ОКБ-122-7. Триботехнические свойства смазки (см. Таблицу 2), определяли по методике испытаний магнитных масел, испытания смазки

проводились при постоянном восполнении ее потерь на дорожке трения. Независимо от условий испытаний, смазочные свойства магнитного масла ММ-ПОМ1 выше, чем у смазки ОКБ-122-7 даже без присадки. Важный результат такого сравнения смазочных материалов заключается в том, что магнитные масла можно эффективно применять вместо пластичных смазок, содержащих полиэтилсилоксан.

### **3.2. Масла на основе триэтанолamina**

Смазочные свойства магнитного масла ММ-ТЭА и его основы (ТЭА) указаны в Таблице 2. Масло ММ-ТЭА(1) содержит 2 об.%. дисперсных частиц, что соответствует минимуму интенсивности изнашивания мягких материалов. В масле ММ-ТЭА(2) содержание дисперсных частиц – 10 об. %. Различие свойств магнитных масел на основе ТЭА объясняется тем, что при смазывании маслом пар трения из таких сравнительно мягких материалов как бронза (латунь) – незакаленная сталь, интенсивность изнашивания проходит через минимум при увеличении содержания дисперсной фазы  $Fe_3O_4$ , а при смазывании материалов с микротвердостью выше чем у магнетита (~5 ГПа), монотонно увеличивается [18]. При смазке мягких материалов зависимость силы трения от содержания частиц так же проходит через минимум, для твёрдых материалов сила трения слабо растёт с увеличением концентрации частиц.

В целом смазочные свойства магнитного масла ММ-ТЭА находятся на уровне свойств лучших магнитных масел, а при небольшой концентрации магнетита оно может конкурировать с нефтяными немагнитными маслами (см. Таблицу 2). Однако, магнитное масло ММ-ТЭА имеет и существенный недостаток - низкую смазочную эффективность при повышенных температурах. На рис. 1 приведены температурные зависимости диаметра пятна износа различных магнитных масел и их основ. Магнитное масло на основе ТЭА при температуре выше 60°C резко теряет способность снижать износ, хотя из-за наличия дисперсных частиц, эта критическая температура даже более высока, чем у жидкости ТЭА. Данный недостаток магнитного масла вызван низкой прочностью граничных адсорбционных слоев, образованных молекулами ТЭА. По этой же причине при смазке жидкостью ТЭА пары трения бронза-сталь наблюдается адгезионный перенос бронзы на поверхность стального образца.

Рассматриваемое магнитное масло ММ-ТЭА несколько лучше, чем, например, магнитные масла на основе силоксанов, хорошо сохраняют исходную коллоидную структуру при трибовоздействиях и в неоднородных магнитных полях.

#### **4. Заключение**

Магнитные масла на основе перфторполиэфира ПОМ в целом имеют более высокие смазочные свойства чем масла на основе других жидкостей, особенно в области средних нагрузок. Противоизносные свойства масла ММ ПОМ начинают резко ухудшаться при температуре, превышающей 150°C, хотя для основы этого масла критическая температура потери противоизносных свойств на 100–150°C выше. Одновременно при указанной температуре нарушается коллоидная устойчивость магнитного масла ММ-ПОМ. Дополнительно улучшить смазочные свойства фторорганических магнитных масел с помощью присадок не всегда удаётся из-за плохой растворимости в них поверхностно-активных веществ. По этой же причине сложно синтезировать агрегативно устойчивые магнитные масла на основе распространённых фторорганических жидкостей ПФТ-100 и ПЭФ-240. В то же время, если не учитывать стоимость, то магнитные масла на основе фторорганических жидкостей наиболее перспективны для применения в разнообразных узлах трения благодаря сочетанию уникальных свойств: высокой теплоте испарения, хорошим низкотемпературным свойствам, плохой растворимости в воде и в различных маслах, химической инертности по отношению ко многим твердым материалам, высокой термической и окислительной стабильностью свойств.

Смазочные свойства магнитных масел на основе триэтанолamina ММ-ТЭА примерно такие же, как у магнитных масел на основе силиконов, но несколько хуже, чем у традиционных немагнитных масел. Существенный недостаток масла ММ-ТЭА заключается в низком значении критической температуры. В тоже время технология получения масла простая и стоимость его низкая. Магнитное масло ММ-ТЭА может успешно использоваться для смазки механизмов машин, работающих во взрывоопасных условиях.

Один из основных выводов по работе, заключается в том, что по трибологическим свойствам исследованные магнитные масла сравнимы с традиционным пластичным и жидким смазочными материалами. Однако, наличие у магнитных масел аномальных для жидкостей магнитных свойств значительно расширяет область их эффективного применения. В реальных узлах трения магнитное смазочное масло имеет преимущество из-за того, что оно будет за счет самоорганизации в магнитном поле поступать в зону трения из мини-резервуара и заменять там отработавшее масло.

#### **Библиографический список:**

1. Орлов, Д.В. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.

2. **Болотов, А.Н.** Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография / А.Н. Болотов, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2019. – 164 с.
3. **Мищак, А.** Трибологические свойства феррожидкости / А. Мищак // Трение и износ. – 2006. – Т. 27. – № 3. – С. 330-336.
4. **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.
5. **Фертман, В.Е.** Магнитные жидкости: справочное пособие / В.Е. Фертман. – Минск: Вышэйшая школа. 1988. – 184 с.
6. **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.
7. **Gorlenko, A.O.** Investigation of physical properties of magnetic liquids in alternating and constant magnetic fields / A.O. Gorlenko, S.P. Shetz // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 327. – I. 4. – Art. № 042039. – 5 p. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042039.
8. **Lineira del Rio, J.M.** Tribological behavior of nanolubricants based on coated magnetic nanoparticles and trimethylolpropane trioleate base oil / J.M. Lineira del Rio, E.R. López, M.G. Gómez et al. // Nanomaterials. – 2020. – V. 10. – I. 4. – Art. № 683. – 22 p. DOI: 10.3390/nano10040683.
9. **Trivedi, K.** Analyzing lubrication properties of magnetic lubricant synthesized in two lubricating oils / K. Trivedi // Wear. – 2021. – V. 477. – Art. № 203861. – 11 p. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203861.
10. **Болотов, А.Н.** Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография / А.Н. Болотов, В.Л. Хренов. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2008. – 124 с.
11. **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.
12. **Мельников, В.Г.** Перфторполиэфиры как основа смазочных материалов / В.Г. Мельников, Т.В. Попкова, Л.Б. Капустина, М.В. Диброва // Химия и технология топлив и масел. – 1990. – № 4. – С. 36-38.
13. **Калинин, А.А.** Смазочные свойства водосодержащих жидкостей на основе триэтаноламина / А.А. Калинин, В.Г. Мельников // Химия и технология топлив и масел. – 1988. – № 7. – С. 20-25.
14. **Пат. 2023317 С1 Российская Федерация МПК Н01F 1/28.** Способ получения магнитной жидкости на фторорганической основе / В.А. Силаев, Е.Н. Бойкова; заявитель и патентообладатель Редкинский опытный завод. – № 5042967/02; заявл. 27.12.1991; опубл. 15.11.1994.
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). – 22.01.2023.
16. **Болотов, А.Н.** Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 1 / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, М.В. Мардян // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. – 2013. – № 6. – С. 68-74.
17. **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.
18. **Болотов, А.Н.** Влияние нанодисперсной фазы магнитных масел на их смазочные свойства / А.Н. Болотов, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 545-560. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.545.

#### References:

1. Orlov D.V., Mikhalev Yu.O., Myshkin N.K. *Magnitnye zhidkosti v mashinostroenii* [Magnetic fluids in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1993, 272 p. (In Russian).
2. Bolotov A.N., Izmailov V.V., Novoselova M.V. *Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya protsessov v tribotekhnicheskikh sistemakh: monografiya* [Theoretical and experimental studies of processes in tribological systems]. Tver, Tverskoy gosudarstvenny tekhnicheskiy universitet Publ., 2019, 164 p. (In Russian).
3. Miszczak A. Tribologicheskie svoystva ferrozhidkosti [Tribological behavior of ferro-fluid], *Trenie i iznos [Journal of Friction and Wear]*, 2006, vol. 27, no. 3, pp. 330-336. (In Russian).
4. Bolotov A.N., Lochagin N.V., Mikhalev Yu.O. Role of magnetic field in friction of surfaces lubricated by magnetic oil, *Soviet Journal of Friction and Wear*, 1988, vol. 9, issue 5, pp. 80-86.

5. Fertman V.E. *Magnitnye zhidkosti: spravochnoe posobie* [Magnetic fluids]. Minsk, Higher School. Publ., 1988, 184 p. (In Russian).
6. Ermakov S.F. Effect of lubricants and additives on the tribological performance of solids. Part 2. active friction control, *Journal of Friction and Wear*, 2012, vol. 33, issue 3, pp. 217-223. DOI: 10.3103/S106836661203004X.
7. Gorlenko A.O., Shetz S.P. Investigation of physical properties of magnetic liquids in alternating and constant magnetic fields, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, issue 4, art. no. 042039, 5 p. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042039.
8. Lineira del Rio J.M., López E.R., Gómez M.G. et al. Tribological behavior of nanolubricants based on coated magnetic nanoparticles and trimethylolpropane trioleate base oil, *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, issue 4, art. no. 683, 22 p. DOI: 10.3390/nano10040683.
9. Trivedi K. Analyzing lubrication properties of magnetic lubricant synthesized in two lubricating oils, *Wear*, 2021, vol. 477, art. no. 203861, 11 p. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203861.
10. Bolotov A.N., Khrenov V.L. *Tribotekhnika magnitopassivnykh opor skol'zheniya: monografiya* [Tribotechnics of magneto-passive sliding bearings]. Tver, Tver State Technical University Publ., 2008, 124 p. (In Russian).
11. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Studying tribotechnical properties of nanostructured lubricating oils with various dispersive media, *Journal of Friction and Wear*, 2017, vol. 38, issue 2, pp. 121-125. DOI: 10.3103/S1068366617020040.
12. Mel'nikov V.G., Popkova T.V., Kapustina L.B., Dibrova M.V. Perftorpoliefiry kak osnova smazochnykh materialov [Perfluoropolyethers as a basis for lubricants], *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel* [Chemistry and Technology of Fuels and Oils], 1990, no. 4, pp. 36-38. (In Russian).
13. Kalinin A.A., Mel'nikov V.G. Lubricating properties of water-containing fluids based on triethanolamine, *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 1988, vol. 24, issue 7, pp. 294-297. DOI: 10.1007/BF00725549.
14. Silaev V.A., Boikova E.N. *Sposob polucheniya magnitnoy zhidkosti na ftororganicheskoy osnove* [The method of obtaining a magnetic fluid on an organofluorine basis]. Patent RF, no. 2023317, 1991. (In Russian).
15. Bajburtskij F.S. *Magnitnye zhidkosti: sposoby polucheniya i oblasti primeneniya* [Magnetic fluids: production methods and applications]. Available at: [www.url: http://magneticliquid.narod.ru/authority/008.htm](http://magneticliquid.narod.ru/authority/008.htm) (accessed 22.01.2023).
16. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O., Mardyan M.V. Komplekt oborudovaniya dlya issledovaniya fiziko-khimicheskikh svoystv nanodispersnykh magnitnykh sred. Chast 1 [A set of equipment for studying the physicochemical properties of nanodispersed magnetic media. Part 1], *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detalej tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya* [Mechanics and physics of processes on the surface and in contact with solids, parts of technological and power equipment]. 2013, no. 6, pp. 68-74. (In Russian).
17. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O., Gorlov D.I. Komplekt oborudovaniya dlya issledovaniya fiziko-khimicheskikh svoystv nanodispersnykh magnitnykh sred. Chast 2 [A set of equipment for studying the physicochemical properties of nanodispersed magnetic media. Part 2], *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detalej tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya* [Mechanics and physics of processes on the surface and in contact with solids, parts of technological and power equipment], 2014, no. 7, pp. 85-89. (In Russian).
18. Bolotov A.N., Novikova O.O. Vliyanie nanodispersnoj fazy magnitnykh masel na ikh smazochnye svoystva [The effect of the nanodisperse phase of magnetic oils on their lubricating properties], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2022, issue 14, pp. 545-560. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.545. (In Russian).

*Original paper*

## **LUBRICANT PROPERTIES OF NANODISPERSE MAGNETIC OILS BASED ON NOVEL TECHNICAL LIQUIDS**

A.N. Bolotov, L.E. Afanasieva, V.V. Meshkov  
*Tver State Technical University, Tver, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.679

**Abstract:** The paper presents the results of studying properties of magnetic lubricating oils synthesized on the basis of fluoroorganic fluids and triethanol. The lubricating properties of oils were determined in the boundary friction mode under medium and high contact pressures. It is shown that magnetic oils based on perfluoropolyether have higher lubricating properties than oils based on other

fluids, especially in the medium load range. The anti-wear properties and aggregative stability of oil begin to deteriorate sharply at temperatures exceeding 150°C. The use of perfluoropolyether liquid as an additive to oil made it possible to improve the antiwear properties of magnetic oil at medium and high contact pressures. The lubricating properties of magnetic oils based on triethanolamine are approximately the same as those of magnetic oils based on siloxanes, but worse than those of traditional non-magnetic oils. In terms of tribological properties, the studied magnetic oils are comparable to traditional plastic and liquid lubricants. The fact that magnetic oils have magnetic properties that are anomalous for liquids expands the area of their effective application significantly.

*Keywords: magnetic lubricating oil, fluoroorganic liquids, triethanolamine, nanodisperse particles, friction, wear.*

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

*Афанасьева Людмила Евгеньевна – к.ф.-м.н., доцент кафедры технологии металлов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»*

*Мешков Владимир Валентинович – д.т.н., профессор, декан машиностроительного факультета, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»*

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

*Ludmila E. Afanasieva – Ph. D., Docent, Docent of the Metal Technology and Materials Science Department, Tver State Technical University*

*Vladimir V. Meshkov – Dr. Sc., Professor, Head of the Mechanical Engineering Faculty, Tver State Technical University*

Поступила в редакцию/received: 20.01.2023; после рецензирования/revised: 25.02.2023; принята/accepted: 28.02.2023.