

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ СРЕД

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: gbtms@yandex.ru

© Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., 2022

Рассмотрено воздействие магнитного поля на физико-химические и триботехнические свойства традиционных смазочных материалов и инновационных наноструктурных магнитных масел и жидкостей. Проанализированы причины изменения этих свойств. Показано, какие факторы в первую очередь влияют на поляризуемость масел и поглощение электромагнитного излучения. Для оценки физико-химических свойств были использованы методы диэлектрики и инфракрасной спектроскопии. Интегральное воздействие магнитного поля на процесс трения поверхностей, смазанных традиционными немагнитными и магнитными маслами, исследовалось на торцевой машине трения. Сделан вывод о существенном изменении отдельных физико-механических и химических свойств магнитных смазочных материалов при воздействии магнитного поля. Установлен магнитотрибологический эффект, заключающийся во влиянии однородного магнитного поля на смазочные свойства магнитного масла. Описано влияние однородных магнитных полей на противоизносные свойства масла. Сделан вывод о том, что поле снижает агрегативную устойчивость магнитного масла.

Ключевые слова: магнитное наномасло, трение, износ, магнитный коллоид, полимерные оболочки, вязкость, смазка.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-3-15-22

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость существенного повышения долговечности и энергоэффективности производственного оборудования заставляет использовать в конструкциях инновационные материалы. В частности, в современных узлах трения все шире применяют конструкционные и смазочные магнитные материалы – магнитные жидкости (масла). Магнитные жидкости и другие коллоидные материалы на их основе обладают уникальным сочетанием механических, физических и химических свойств, в связи с чем научный интерес к ним не ослабевает [1]. Большое внимание уделяется проблемам применения магнитных жидкостей для смазывания триботехнических узлов [2, 3]. Отличительной особенностью магнитожидкостных трибоузлов является то, что магнитный смазочный материал поступает в зону трения и удерживается там с помощью стационарных неоднородных магнитных полей. Поэтому для смазки магнитожидкостных трибоузлов не требуется специальных механических устройств, предназначенных для обеспечения регенерации смазочного слоя и восполнения потерь масла. Трибосопряжения не должны быть абсолютно герметичными, а объем магнитной жидкости (масла) может быть относительно небольшим (несколько кубических сантиметров) и др. Однако необходимо учитывать, что в процессе

эксплуатации под действием магнитных полей, генерируемых элементами конструкции узла трения из магнитных материалов, физико-химические и триботехнические свойства традиционных смазочных материалов, наноструктурных магнитных масел и жидкостей изменяются. Данный факт необходимо учитывать при проектировании узла и выборе смазочной среды.

Цель данной работы заключалась в изучении воздействия магнитного поля на физико-химические и триботехнические свойства различных по структуре смазочных материалов.

Воздействие магнитных полей на структуру и свойства веществ в жидком состоянии изучалось в работах [4–7], анализировалось изменение их смазывающих и смачивающих свойств и процессов кристаллизации жидкостей после магнитной обработки. Ниже рассмотрены наиболее значимые факторы, приводящие к изменению свойств жидкостей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Диэлектрические свойства измерялись с помощью прибора Е8-4 на частоте 1 кГц в однородных полях относительно большой напряженности – до 1,2 МА/м и неоднородных полях с градиентом до 40 МА/м². Силовые линии электрического и магнитного полей были коллинеарны (чтобы исключить побочный эффект, вызванный действием силы Лоренца на движение ионов, небольшое количество которых всегда содержится в масле). Температура масла поддерживалась постоянной, время магнитообработки достигало 12 ч.

Спектры поглощения веществ в инфракрасной области снимались на приборе Spesord непосредственно после выдержки масла в поле напряженностью 170 кА/м в течение 100...150 ч. Все измерения проводились с большой тщательностью и многократно повторялись.

Исследовался большой набор органических и синтетических масел: TAD-17, U-20, VKG-96, PES-5, глицерин и др.

Исследования смазочных свойств жидких сред проводились на торцевой машине трения МТП [8] в масляной ванне при скорости скольжения до 1 м/с и нагрузке до 2 МПа.

Для оценки коррозионных свойств масел при циклирующих механических напряжениях использовался оригинальный прибор [9].

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА НЕМАГНИТНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ДИСПЕРСИОННЫЕ СРЕДЫ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Воздействие магнитных полей на структуру и свойства веществ в жидком состоянии изучалось в работах [4–7], где анализировалось изменение их смазывающих и смачивающих свойств и процессов кристаллизации жидкостей после магнитной обработки. Нам представляется возможным выделить три эффекта, приводящих к изменению свойств жидкостей.

Во-первых, изменение полярности молекул вследствие расщепления энергетических уровней атомов.

Во-вторых, структурирование жидкости и макроперераспределение компонентов [4]. Структурирование объясняется действием на магнитоанизотропные молекулы вращающего магнитного момента M :

$$M = \frac{1}{2} \Delta\chi \mu_0 H^2 V \sin 2\alpha,$$

где $\Delta\chi$ – разность магнитных восприимчивостей в параллельном и перпендикулярном к оси молекулы направлении; H – напряженность магнитного поля; V – объем, занимаемый молекулой; α – угол между осью молекулы и направлением поля.

Перераспределение компонентов происходит в жидкостях, имеющих молекулы с различной магнитной восприимчивостью и находящихся в неоднородном магнитном поле. В этих условиях наблюдается магнитостатическая сепарация молекул под действием силы:

$$F = \frac{1}{2} \chi \mu_0 V \text{grad} M^2,$$

где χ – магнитная восприимчивость молекул.

В-третьих, дополнительная энергия молекул в магнитном поле изменяет характер сольватных комплексов внутри жидкости и на межфазной границе [5, 6].

Перечисленные эффекты должны влиять на поляризуемость масел и поглощение электромагнитного излучения. В связи с этим их значимость оценивалась методами диэлькометрии и инфракрасной спектроскопии.

Результаты диэлькометрических исследований не позволяют говорить о каком-либо существенном изменении поляризуемости молекул масел в магнитном поле (по крайней мере с точностью до 0,1 %). Наблюдалось некоторое изменение тангенса диэлектрических потерь после длительной выдержки в поле. Например, для вазелинового масла с добавками олеиновой кислоты изменение составило 2...4 % и было одним из самых значительных. Этот результат, несомненно, связан с влиянием наведенной магнитным полем анизотропии в расположении молекул в области инфракрасного спектра. Изменения в поглощательной способности масел не проявились.

Предполагаемое магнитосепарационное перераспределение молекул по объему вещества электроспектральными методами не выявлено. С молекулярно-кинетических позиций результат не вызывает сомнения, поскольку для молекул масел показатель степени в распределении Больцмана значительно меньше единицы.

Из вышеизложенного нельзя сделать вывод о каком-либо существенном изменении отдельных физико-механических и химических свойств материалов трения при воздействии магнитного поля.

Экспериментально оценивалось интегральное воздействие магнитного поля на процесс трения поверхностей, смазанных традиционными немагнитными маслами. В зоне трения электромагнитом создавалось однородное магнитное поле для исключения индукционных токов через контакт и скапливания частиц износа. В процессе исследований фиксировался момент трения, износ измерялся профилографическим методом после испытаний.

С точностью до 3 % отклонений среднего значения момента трения при включении магнитного поля не происходило, хотя характер его несколько менялся. Повышение объемной температуры до 360 К не привело к каким-либо изменениям в поле. Это подтверждает справедливость заключения о слабом влиянии гальваномагнитных эффектов [11], роль которых зачастую абсолютизируется. Анализ результатов опытов на изнашивание не показал какой-либо корреляционной связи величины износа с воздействием магнитного поля.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КОЛЛОИДНУЮ СТРУКТУРУ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

В отличие от традиционных, магнитные масла содержат сильномагнитные дисперсные частицы, энергия которых в магнитном поле сравнима с тепловой энергией, поэтому в неоднородном магнитном поле возможно перераспределение их содержания по объему вещества [1]. Степень перераспределения частиц достаточно просто оценить по локальному изменению намагниченности насыщения вещества, которая пропорциональна объемному насыщению магнитной фазы.

Полученные данные показывают, что перераспределение содержания магнитной фазы в масле может оказаться существенным и процесс перехода к равновесному распределению протекает наиболее интенсивно в первые часы после включения поля.

Фракционный анализ масла, проведенный методами электронной микроскопии, показал, что перераспределение ферромагнитных частиц происходит по двум параметрам: по их концентрации и размерам. Крупные частицы, а также их агломераты преобладали в тех слоях, где напряженность поля была выше.

Следует отметить, что прогнозировать поведение дисперсных частиц в неоднородном поле на основании распределения Больцмана не всегда правомерно, поскольку в этом случае не учитывается дипольное взаимодействие частиц. Как следует из опытных данных [10, 12–14], отклонение от распределения Больцмана усиливается при увеличении дисперсности частиц, разброса по дисперсионному составу и пока труднопредсказуемо.

В узлах трения приповерхностное повышение концентрации дисперсных частиц может происходить как под влиянием внешних полей, так и полей, возникающих на ферромагнитных поверхностях в месте выхода междоменных границ или месте, где наблюдается скачок нормальной составляющей намагниченности.

Указанное перераспределение частиц в масле, безусловно, негативно влияет на износостойкость узла трения. Особенно это сказывается в начале работы узла, находившегося до этого продолжительное время в состоянии покоя.

Был обнаружен новый магнитотрибологический эффект, который заключается во влиянии однородного магнитного поля на смазочные свойства масла. Оказалось, что в результате воздействия на масло даже относительно слабых однородных полей с напряженностью около $2 \cdot 10^3$ А/м противоположные свойства масла ухудшаются. С увеличением напряженности поля эффект проявляется сильнее. Причина заключается в том, что поле снижает агрегативную устойчивость магнитного масла. В магнитном поле усиливается диполь-дипольное взаимодействие частиц и происходит их частичная флокуляция. Образующиеся агломераты частиц вызывают абразивный износ поверхностей. Размеры агломератов достигают нескольких микрон и поэтому легко могут быть обнаружены с помощью оптического микроскопа при наблюдении тонкого слоя масла в проходящем свете.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГРАНИЧНОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ

Магнитное поле влияет на коллоидную структуру масла, динамику формирования смазочного слоя на поверхностях трения и на их механические свойства. Наиболее важная функция магнитного поля в магнитных подшипниковых опорах заключается в организации движения магнитного масла через зону трения для обеспечения регенерации смазочной пленки. Например, если отключить магнитное поле после начала испытаний магнитного масла на основе полиэтилсилоксана на машине трения МТП, то коэффициент трения постепенно возрастает от 0,15 до более

чем 0,3 и трение становится скачкообразным из-за нарушения сплошности смазочной пленки и развивающихся процессов схватывания. Это происходит потому, что, несмотря на наличие большого объема резервного масла, его поступление в зону трения под действием поверхностных сил и сил тяжести происходит недостаточно быстро из-за сравнительно высокой вязкости масла. В магнитном же поле на масло действуют магнитные силы, которые легко преодолевают силы внутреннего трения при невысоких скоростях сдвига в масле и обеспечивают регенерацию смазочной пленки.

Еще одна особенность магнитных масел, находящихся в магнитном поле, касается их реологических свойств. Когда магнитное масло находится длительное время в неподвижном состоянии, в нем под действием магнитного поля начинают развиваться процессы тиксотропного структурообразования. Предельное напряжение сдвига структурированной магнитной жидкости может достигать значительной величины – до 10^4 Па. При проектировании магнитожидкостных узлов трения следует учитывать возрастание момента сил трения при пуске (начале движения) из-за растянутого во времени процесса структурообразования. После разрушения структуры под действием сдвиговых напряжений реологические свойства магнитного масла приблизительно такие же, как у ньютоновских жидкостей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования физико-химических свойств методами диэлектрической и инфракрасной спектроскопии показали, что при воздействии магнитного поля происходят существенные изменения отдельных физико-механических и химических свойств магнитных смазочных материалов. Для традиционных немагнитных смазочных материалов этот эффект незначителен.

Установлен магнитный трибологический эффект, заключающийся во влиянии однородного магнитного поля на смазочные свойства магнитного масла. Воздействие на масло однородных магнитных полей приводит к ухудшению его противоизносных свойств.

Положительная роль магнитного поля при трении поверхностей, смазанных магнитной жидкостью, заключается в том, что оно ускоряет процесс регенерации смазочной пленки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полунин В.М. Акустические свойства нанодисперсных магнитных жидкостей. М.: Физматлит, 2012. 383 с.
2. Song W.L., Choi S.B., Choi J.Y., Lee C.H. Wear and friction characteristics of magnetorheological fluid under magnetic field activation // *Tribology Transactions*. 2011. V. 54. № 4. P. 616–624.
3. Ермаков С.Ф. Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Ч. 2. Активное управление трением // *Трение и износ*. 2012. Т. 33. № 3. С. 275–283.
4. Щурин К.В., Цветкова Е.В. Изменение физико-химических свойств жидких сред методом омагничивания // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2011. № 10 (129). С. 199–204.
5. Сафронов В.Н., Горленко Н.П., Саркисов Ю.С., Абзаев Ю.А., Кугаевская С.Н., Ермилова Т.А. Роль цикловой магнитной обработки воды затворения в управлении свойствами и процессами гидратации и структурообразования цементных систем // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. № 4 (45). С. 135–148.

6. Кестельман В.Н. Физические методы модификации полимерных материалов. М.: Химия, 2014. 224 с.

7. Горленко Н.П., Сафронов В.Н., Абзаев Ю.А., Саркисов Ю.С., Кугаевская С.А., Ермилова Т.А. Магнитное поле как фактор управления свойствами и структурой цементных систем. Ч. 1. Теоретические предпосылки влияния магнитного поля на физико-химические процессы // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015. № 3 (50). С. 134–150.

8. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных смазочных сред. Ч. 4 // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2016. Вып. 9. С. 102–107.

9. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Мардян М.В. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Ч. 1 // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2013. № 6. С. 68–74.

10. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Горлов И.В. Исследование структурной стабильности магнитных масел для узлов трения // *Известия Московского государственного технического университета «МАМИ»*. 2014. Т. 4. № 2. С. 15–17.

11. Бернштейн М.П., Пустовойт В.Н. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. М.: Машиностроение, 1987. 256 с.

12. Lukashova N.V., Savchenko A.G., Yagodkin Yu.D., Muradova A.G., Yurtov E.V. Investigation of structure and magnetic properties of nanocrystalline iron oxide powders for use in magnetic fluids // *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. V. 586. P. 298–300.

13. Коржов А.В., Рябухин А.Г. Влияние электрического и магнитного полей на коррозию алюминиевых оболочек силовых кабелей // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Химия»*. 2013. Т. 5. № 1. С. 40–46.

14. Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Расчет магнитожидкостных узлов трения, эксплуатируемых в безвоздушной или газовой среде // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 42–49.

Для цитирования: Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Влияние магнитного поля на эксплуатационные свойства смазочных сред // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 3 (15). С. 15–22.

THE INFLUENCE OF THE MAGNETIC FIELD ON THE PERFORMANCE PROPERTIES OF LUBRICANTS

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., G.B. BURDO, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: gbtms@yandex.ru

The effect of the magnetic field on the physicochemical and tribotechnical properties of traditional lubricants and innovative nanostructured magnetic oils and liquids is considered. The reasons for changing these properties are analyzed. It is shown which factors primarily affect the polarizability of oils and the absorption of electromagnetic radiation. Methods of dielometry and infrared spectroscopy were used to evaluate the physicochemical properties. The integral effect of the magnetic field on the friction process of surfaces lubricated with

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (15), 2022*

traditional non-magnetic and magnetic oils was studied on an end friction machine. It is concluded that there is a significant change in individual physico-mechanical and chemical properties of magnetic lubricants under the influence of a magnetic field. A magnetotribological effect has been established, consisting in the influence of a homogeneous magnetic field on the lubricating properties of magnetic oil. The effect of homogeneous magnetic fields on the anti-wear properties of the oil is described. It is concluded that the field reduces the aggregative stability of the magnetic oil.

Keywords: magnetic nano oil, friction, wear, magnetic colloid, polymer shells, viscosity, lubrication.

REFERENCES

1. Polunin V.M. Akusticheskie svoystva nanodispersnyh magnitnyh zhidkостей [Acoustic properties of nanodispersed magnetic fluids]. Moscow: Fizmatlit, 2012. 383 p.
2. Song W.L., Choi S.B., Choi J.Y., Lee C.H. Wear and friction characteristics of magnetorheological fluid under magnetic field activation. *Tribology Transactions*. 2011. V. 54. No 4, pp. 616–624.
3. Ermakov S.F. Influence of lubricants and additives on the tribotechnical characteristics of solids. Part 2. Active friction control. *Treniye i iznos*. 2012. V. 33. No 3, pp. 275–283. (In Russian).
4. Shchurin K.V., Tsvetkova E.V. Changing the physico-chemical properties of liquid media by magnetization. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011. No 10, pp. 199–204. (In Russian).
5. Safronov V.N., Gorlenko N.P., Sarkisov Yu.S., Abzaev Yu.A., Kugaevskaya S.N., Ermilova T.A. The role of cyclic magnetic treatment of mixing water in managing the properties and processes of hydration and structure formation of cement systems. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2014. No 4 (45), pp. 135–148. (In Russian).
6. Kestelman V.N. Fizicheskie metody modifikatsii polimernykh materialov [Physical methods of modification of polymeric materials]. Moscow: Khimiya, 2014. 224 p.
7. Gorlenko N.P., Safronov V.N., Abzaev Yu.A., Sarkisov Yu.S., Kugaevskaya S.A., Ermilova T.A. Magnetic field as a factor in controlling the properties and structure of cement systems. Part 1. Theoretical prerequisites for the influence of a magnetic field on physical and chemical processes. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2015. No 3, pp. 134–150. (In Russian).
8. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. A set of equipment for studying the physicochemical properties of nanodispersed magnetic lubricating media. Part 4. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2016. Iss. 9, pp. 102–107. (In Russian).
9. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O., Mardyan M.V. 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, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2013. No 6, pp. 68–74. (In Russian).
10. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O., Gorlov I.V. Study of the structural stability of magnetic oils for friction units. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta «MAMI»*. 2014. V. 4. No 2, pp. 15–17. (In Russian).
11. Bernstein M.P., Pustovoit V.N. Termicheskaya obrabotka stalnykh izdeliy v magnitnom pole [Heat treatment of steel products in a magnetic field]. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 256 p.

12. Lukashova N.V., Savchenko A.G., Yagodkin Yu.D., Muradova A.G., Yurtov E.V. Investigation of structure and magnetic properties of nanocrystalline iron oxide powders for use in magnetic fluids. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. V. 586, pp. 298–300.

13. Korzhov A.V., Ryabukhin A.G. Influence of electric and magnetic fields on the corrosion of aluminum sheaths of power cables *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya*. 2013. V. 5. No 1, pp. 40–46.

14. Burdo G.B., Bolotov A.N. Calculation of magnetic fluid friction units operated in an airless or gaseous environment. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2020. No 2 (6), pp. 42–49.

Поступила в редакцию/received: 28.06.2022; после рецензирования/revised: 05.07.2022;
принята/accepted: 27.07.2022

УДК 621.891

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ, СМАЗАННЫХ МАГНИТНОЙ НАНОСМАЗКОЙ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: gbtms@yandex.ru

© Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., 2022

Изучена динамика изменения контактной разности потенциалов между металлическими поверхностями, смазанными магнитным маслом, и его компонентами. Показано, что смазочные свойства исследуемых жидкостей коррелируют с величиной изменения контактной разности потенциалов после их нанесения. С целью прогнозирования эксплуатационных свойств узлов трения, смазанных магнитным маслом, детально изучены специфические физико-химические особенности процессов, протекающих на твердых поверхностях после нанесения магнитного смазочного материала. Оценка энергетических изменений, происходящих на поверхности после нанесения на нее магнитного масла, производилась по работе выхода электронов. С помощью двухкомпонентного магнитного масла изучено влияние дисперсных частиц магнетита на работу выхода электронов. Частицы магнетита прилипают к поверхности под действием вандерваальсового или дипольного взаимодействия и частично экранируют ее. Из полученных данных следует, что добавление в жидкость триэтанолamina магнитных частиц не приводит к существенному изменению работы выхода во всем временном диапазоне. В то же время частицы магнетита, покрытые слоем адсорбированных молекул жирной кислоты, увеличивают работу выхода электронов.

Ключевые слова: магнитная жидкость, поверхность, работа выхода электрона, эксплуатационные свойства.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-3-22-30

ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности машиностроительных изделий является важной научной и практической задачей. Применение новых смазочных материалов – модифицированных магнитных жидкостей, содержащих нанодисперсные магнитные

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (15), 2022*