

DOI
УДК 62-762.89

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО МАГНИТОЖИДКОСТНОГО УПЛОТНЕНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ

Терентьев Владимир Викторович, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Технический сервис и механика», ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА им. Д. К. Беляева.

153012, г. Иваново, ул. Советская, 45.

E-mail: vladim-terent@yandex.ru

Баусов Алексей Михайлович, д-р техн. наук, проф. кафедры «Технический сервис и механика», ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА им. Д. К. Беляева.

153012, г. Иваново, ул. Советская, 45.

E-mail: bausovaleksey@yandex.ru

Торопов Михаил Владиславович, аспирант кафедры «Технический сервис и механика», ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА им. Д. К. Беляева.

153012, г. Иваново, ул. Советская, 45.

E-mail: m.toropov@spectrauto.ru

Ключевые слова: узел, жидкость, герметичность, уплотнение, долговечность.

Цель исследований – повышение эффективности герметизации подшипниковых узлов за счет применения комбинированных магнитожидкостных уплотнений. Задача исследований – теоретически обосновать предельную концентрацию ферромагнитных частиц в магнитной жидкости, исследовать герметизирующую способность комбинированного магнитожидкостного уплотнения в условиях изменения температуры и частоты вращения вала уплотняемого подшипникового узла. Исследование герметизирующей способности манжетных и магнитожидкостных уплотнений осуществлялось на экспериментальном стенде, позволяющем исследовать герметизирующую способность уплотнений как в статическом, так и в динамическом режиме. На основании теоретических предпосылок определены формулы, позволяющие определять предельную концентрацию твердой и магнитной фаз в магнитной жидкости, разработан состав магнитной жидкости на основе полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-5 с намагниченностью насыщения 40 кА/м, коэффициентом динамической вязкости 11,2 Па·с. В качестве ферромагнитной фазы использовалась смесь магнетита с карбонильным железом. В качестве поверхностно-активного вещества использовалась олеиновая кислота. Исследования по определению герметизирующей способности показали более высокую эффективность комбинированного магнитожидкостного уплотнения по сравнению с манжетным. В условиях статического испытания в области температур от 20 до 60°C критический перепад давлений у комбинированного уплотнения оказался выше, чем у манжетного на 4-16%. Повышение температуры подшипникового узла от 20 до 120°C вызывает снижение критического перепада давлений до 50%. Это объясняется снижением седиментационной устойчивости магнитной жидкости в результате повышения температуры. Исследования показывают, что комбинированное магнитожидкостное уплотнение обладает более высокой герметичностью в момент пуска, чем стандартное манжетное. В отличие от манжетного уплотнения (имеющего тенденцию к потере герметичности в моменты пуска) для комбинированного магнитожидкостного уплотнения при перепаде давлений 0,094 МПа утечки рабочей жидкости из уплотняемого узла не наблюдалось. Полученные результаты позволяют обоснованно подбирать концентрацию магнитных частиц в магнитной жидкости, а также доказывают перспективность замены стандартных манжетных уплотнений комбинированными магнитожидкостными.

STUDY OF HERMETIC ABILITY OF A COMBINED FERROFLUIDIC SEALED OF BEARING ASSEMBLIES

V. V. Terentyev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department «Technical Service and Mechanics», FSBEI HE Ivanovo State Agricultural Academy by Academician D. K. Belyaev.

153012, Ivanovo, Sovetskaya street, 45.

E-mail: vladim-terent@yandex.ru

A. M. Bausov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Technical Service and Mechanics», FSBEI HE Ivanovo State Agricultural Academy by Academician D. K. Belyaev.
153012, Ivanovo, Sovetskaya street, 45.

E-mail: bausovaleksey@yandex.ru

M. V. Toropov, Post-graduate student of the Department «Technical Service and Mechanics», FSBEI HE Ivanovo State Agricultural Academy by Academician D. K. Belyaev.

153012, Ivanovo, Sovetskaya street, 45.

E-mail: m.toropov@spectrauto.ru

Keywords: assembly, fluid, hermetic seal, packing, durability.

The purpose of the research is to increase the efficiency of hermetic ability of bearing assemblies by using combined ferrofluidic sealed. The research objective is theoretic justification of the maximum concentration of ferromagnetic particles in fluid, investigation of hermetic ability of a combined ferrofluidic seal under conditions of temperature changing and speed of a shaft rotation of packing bearing assembly. The study of hermetic ability of lip and ferrofluidic sealed was carried out on a test bench, allowing to determine the packing ability of seals both in static and dynamic mode. On the basis of theoretical data, formulas were determined to find the maximum concentration of hard and magnetic phases in a ferrofluid, and its composition based on a polyethylsiloxane liquid PES-5 with a 40 kA/m saturation magnetization and a 1.2 Pa·s dynamic viscosity coefficient was developed. A mixture of magnetite with powdered iron was used as the ferromagnetic phase. Oleic acid was used as a surfactant. Studies to determine hermetic capacity have shown a higher efficiency of the combined ferrofluidic seal compared to the lip one. During static test within the temperature range between 20 to 60°C, the critical pressure difference of the combined seal was 4-16% higher than that of the lip seal. Temperature increase of the bearing assembly from 20 to 120°C causes a decrease in critical pressure difference of up to 50%. This is due to a decrease in the sedimentative stability of the magnetic fluid as a result of an increase in temperature. Studies show that the combined ferrofluidic seal has a higher hermetic tightness at the starting torque than the standard lip seal. In contrast to the lip seal (which tends to lose its tightness at the starting torque), no leakage of pressure fluid from the sealed unit was observed of the combined ferrofluidic one with a pressure drop of 0.094 MPa. The results obtained allow reasonably select the concentration of magnetic particles in the ferrofluid, and also prove the prospects of replacing standard lip seals with combined ferrofluidic ones.

Проблема повышения ресурса подшипниковых узлов машин и механизмов является актуальной на современном этапе. Одним из путей повышения ресурса подшипниковых узлов является совершенствование применяемых смазочных материалов путем введения в их состав компонентов, получаемых методами нанотехнологии, таких, как жидкокристаллические соединения [1-2], а также магнитоуправляемые материалы [3].

Перспективным также является применение магнитожидкостных уплотнений различного конструктивного исполнения.

Основным рабочим телом в данных уплотнениях является магнитная жидкость, представляющая собой коллоидный раствор частиц ферромагнитного материала в жидкостиносителе. Для предотвращения слипания ферромагнитных частиц в магнитную жидкость дополнительно вводят различные поверхностно-активные вещества (ПАВ). Применяемые ПАВы являются стабилизаторами, позволяющими предотвращать оседание ферромагнитных частиц и расслаивание магнитных жидкостей. Рабочий диапазон применения магнитожидкостного уплотнения в основном определяется величиной магнитного момента единичного объема магнитной жидкости. Данный момент определяется как сумма магнитных моментов ферромагнитных частиц, которые входят в данный объем и определяется по формуле [4]:

$$\overline{M} = \sum_{i=1}^n V' \cdot M', \quad (1)$$

где V' – объем, занимаемый одной ферромагнитной частицей, м³;

M' – намагниченность насыщения ферромагнитных частиц, кА/м.

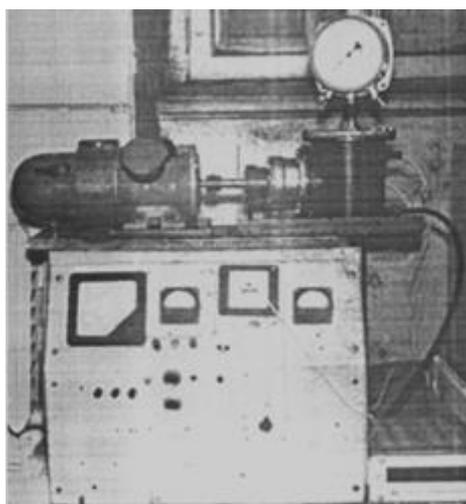
Таким образом, увеличение концентрации ферромагнитных частиц в единичном объеме способствует повышению магнитного момента, который при воздействии с неоднородным магнитным полем приводит к возникновению пондеромоторной силы, удерживающей магнитную жидкость в уплотнении. Однако, с другой стороны, значительное увеличение концентрации ферромагнитных частиц приводит к тому, что несмотря на применяемые ПАВы происходит коагуляция частиц, их

оседание и расслаивание магнитной жидкости, приводящие к нарушению герметичности уплотнения. Вследствие этого существует определенная концентрация ферромагнитных частиц в магнитной жидкости, которая позволяет получать максимальный магнитный момент при условии высокой стабильности и устойчивости самой жидкости.

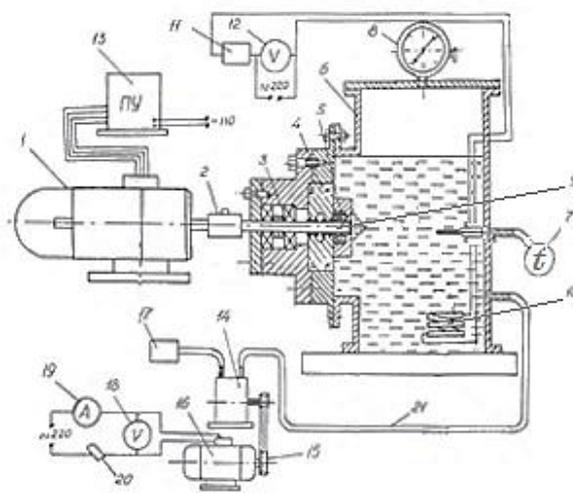
Цель исследований – повышение эффективности герметизации подшипниковых узлов за счет применения комбинированных магнитожидкостных уплотнений.

Задача исследований – теоретически обосновать предельную концентрацию ферромагнитных частиц в магнитной жидкости, исследовать герметизирующую способность комбинированного магнитожидкостного уплотнения в условиях изменения температуры и частоты вращения вала уплотняемого подшипникового узла.

Материалы и методы исследований. Исследование герметичности уплотнений осуществлялось на экспериментальном стенде, представленном на рисунке 1.



а



б

Рис. 1. Экспериментальный стенд для определения герметичности уплотнений:

- а – внешний вид; б – схема: 1 – электродвигатель приводной; 2 – муфта; 3 – подшипниковый узел; 4 – магнитожидкостное уплотнение; 5 – манжета; 6 – бак; 7 – датчик температуры ТW-N, тип РТ-100; 8 – манометр; 9 – вал магнитный; 10 – нагреватель; 11 – терморегулятор; 12, 18 – вольтметры; 13 – пульт управления (преобразователь частоты вращения); 14 – компрессор; 15 – передача клиноременная; 16 – электродвигатель привода компрессора; 17 – фильтр; 19 – амперметр; 20 – пускатель; 21 – трубопровод

Основными узлами стенда являются: бак 6 с маслом, приводной электродвигатель 1, подшипниковый узел 3 с установленным на него уплотнением, компрессор 14 нагревателя, посредством которого изменяется давление внутри бака 6, нагреватель 10.

Принцип работы стенда заключается в следующем (рис. 1). Вращение от приводного двигателя 1 передается на подшипниковый узел 3 через муфту 2. Частота вращения вала приводного двигателя изменяется от 0 до 3000 мин⁻¹ с помощью преобразователя частоты вращения.

В баке 6 находится масло, температура которого изменяется посредством нагревателя 10 и поддерживается постоянной с помощью терморегулятора 11.

Таким образом, принцип действия разработанного стенда основан на объединении двух способов: статического, когда магнитная жидкость сконцентрирована под полюсным наконечником, и гидродинамического, в котором рабочая жидкость движется в уплотняемом зазоре (пробой уплотнения).

В процессе исследований по определению герметизирующей способности в подшипниковый узел устанавливались как отдельно манжетное, так и комбинированное уплотнение. Внешний вид исследованного комбинированного магнитожидкостного уплотнения представлен на рисунке 2.

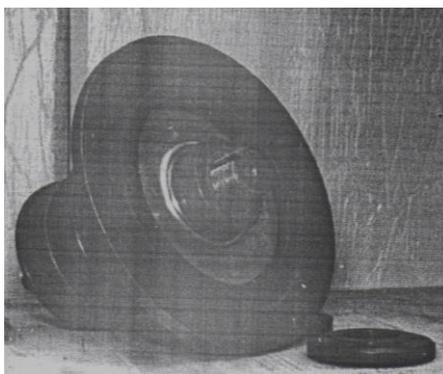


Рис. 2. Внешний вид исследованного комбинированного магнитожидкостного уплотнения

Комбинированное уплотнение представляло из себя двухполюсное магнитожидкостное уплотнение с постоянными феррито-бариевыми магнитами, установленное в немагнитный корпус, с одной стороны которого дополнительно устанавливалось манжетное уплотнение.

Принцип работы уплотнения заключался в том, что при повышении давления в баке давление жидкости передавалось последовательно сначала на манжету, затем на полюса магнитожидкостного уплотнения.

Определение герметизирующей способности исследованных уплотнений осуществлялось по следующей методике. Первоначально магнитожидкостное уплотнение подшипникового узла посредством шприца заполнялось разработанной магнитной жидкостью (для этого в корпусе уплотнения предусмотрено заправочное отверстие).

Далее в бак 6 установки (рис. 1) заливалось моторное масло SHELL HELIX HX7 10W40 (на 2/3 объема). После этого бак 6 закрывался, включался нагреватель 10. В соответствии с программой исследований температура масла при нагреве постепенно повышалась от 20 до 120°C. Максимальное значение температуры при исследованиях выбрано исходя из условия сохранения седиментационной устойчивости магнитной жидкости, а также величины максимального нагрева смазочного материала в подшипниковых узлах сельскохозяйственной техники и оборудования.

Каждые 20°C температура фиксировалась и определялся критический перепад давлений (разница между максимальным давлением в баке установки и атмосферным давлением снаружи бака). Повышение давления в баке осуществлялось посредством компрессора 14. Постепенно увеличивая давление внутри бака, добивались такого его значения, при котором происходило нарушение герметичности уплотнения (появление масла на валу снаружи подшипникового узла). При этом наблюдалось снижение давления в баке 6, которое контролировалось посредством манометра 8. Таким образом реализовывался статический способ определения герметизирующей способности уплотнения.

Для реализации гидродинамического способа дополнительно включался приводной электродвигатель 1. Исследования осуществлялись в диапазоне частот вращения от 0 до 2400 мин⁻¹. Через каждые 600 мин⁻¹ определялся также критический перепад давлений.

Аналогичные исследования проводились и для манжетного уплотнения. За критерий количественной оценки принята величина критического перепада давлений, при котором наступало нарушение герметичности.

Результаты исследований. Для расчета предельной концентрации частиц предполагаем, что частицы в магнитной жидкости имеют одинаковые размеры и сферическую форму.

Согласно известному утверждению Гаусса и гипотезе Кеплера, наиболее плотная упаковка равных сфер достигается тогда, когда каждая сфера соприкасается с двенадцатью соседними. Плотность упаковки сфер при этом составит:

$$V_v / V_{\text{ж}} = 0,74048, \quad (2)$$

где V_v – суммарный объем всех частиц в упаковке, м³;

$V_{\text{ж}}$ – объем, в котором размещены частицы, с учетом расстояний между сферами, м³.

Суммарный объем всех частиц можно определить по формуле:

$$V_v = V_m + V_n + V_{\text{ш}}, \quad (3)$$

где V_M – объем магнитной фазы, м³;
 V_H – объем немагнитной фазы, м³;
 $V_{ш}$ – объем, занимаемый шаровым слоем ПАВ, адсорбированного ферромагнитной частицей, м³.

Намагниченность насыщения магнитной жидкости можно представить в виде зависимости:

$$M_s = V_M / V_{ж} \cdot M', \quad (4)$$

где $V_M / V_{ж}$ – концентрация магнитной фазы в жидкости;
 M' – намагниченность вещества частиц твердой фазы, кА/м.

Учитывая, что

$$V_{ч} / V_{ж} = (V_M + V_H + V_{ш}) / V_{ж} = (V_M / V_{ж}) \cdot (1 + (V_H + V_{ш}) / V_M), \quad (5)$$

а также то, что V_M , V_H , $V_{ш}$ пропорциональны объемам этих фаз в одной частице, а частицы по предположению одинаковы, получаем следующие выражения:

$$V_M = 4/3 \cdot \pi \cdot r_M^3, \quad (6)$$

$$V_H = 4/3 \cdot \pi \cdot (r_M + h)^3 - 4/3 \cdot \pi \cdot r_M^3, \quad (7)$$

$$V_{ш} = 4/3 \cdot \pi \cdot (r_M + h + l)^3 - 4/3 \cdot \pi \cdot r_M^3, \quad (8)$$

где r_M – радиус магнитного ядра частицы, м;

h – толщина немагнитного слоя, м;

l – толщина слоя ПАВ, м.

Преобразуя формулу (5) с учетом формулы (2) и подставляя зависимости (6), (7) и (8), получаем предельные концентрации твердой и магнитной фаз:

$$V_M / V_{ж} = 0,74048 \cdot (1 + (h + l) / r_M)^{-3}, \quad (9)$$

$$V_H / V_{ж} = 0,74048 \cdot (1 + l / (h + r_M))^{-3}. \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) позволяют вычислять предельную концентрацию твердой и магнитной фаз в магнитной жидкости.

На основании представленных зависимостей с учетом ранее проведенных исследований [5-7] был разработан состав магнитной жидкости на основе полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-5 с намагниченностью насыщения 40 кА/м (определялась магнитометром ИМАГ-400Ц), коэффициентом динамической вязкости 11,2 Па·с (определялась реовискозиметром Хелплера). В качестве ферромагнитной фазы использовалась смесь магнетита с карбонильным железом. В качестве поверхностно-активного вещества использовалась олеиновая кислота. Процентное соотношение компонентов в магнитной жидкости следующее: магнетит Fe₃O₄ – 9% масс., карбонильное железо – 26% масс., олеиновая кислота – 25% масс., полиэтилсилоксан ПЭС-5 – 40% масс.

На рисунке 3 представлены результаты определения критического перепада давлений для манжетного и комбинированного уплотнений.

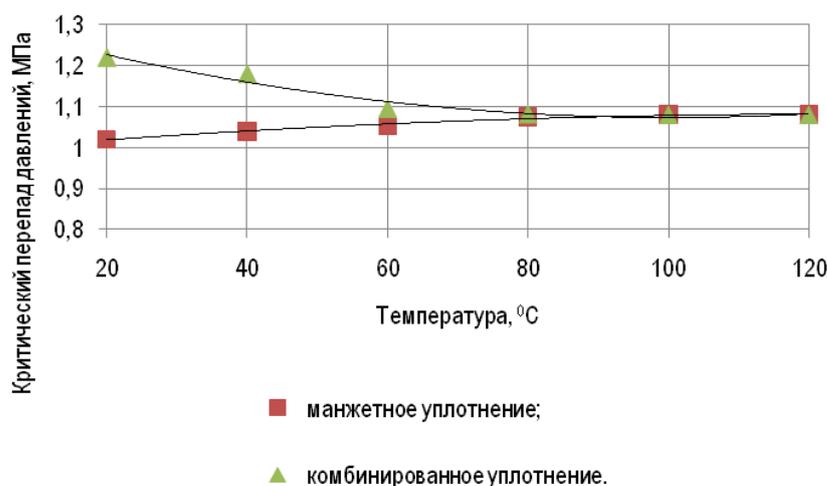


Рис. 3. Зависимость критического перепада давлений для исследованных уплотнений от изменения температуры

Анализируя представленные зависимости можно отметить преимущество комбинированного магнитожидкостного уплотнения перед стандартным манжетным.

В условиях статического испытания в области температур от 20 до 60°C критический перепад давлений у комбинированного уплотнения оказался выше, чем у манжетного на 4-16%. Это объясняется тем, что манжета, установленная в комбинированном уплотнении, удерживает большую часть давления масла, а на полюсные наконечники магнитожидкостного уплотнения действует только то масло, которое не удерживается манжетой.

Изменение температуры подшипникового узла от 20 до 120°C вызывает снижение критического перепада давлений до 50%. Это объясняется снижением седиментационной устойчивости магнитной жидкости в результате повышения температуры. При этом при повышении температуры масла свыше 90°C критический перепад давлений как для манжетного, так и для комбинированного уплотнения оказался одинаков.

Для подшипниковых узлов в процессе эксплуатации наиболее важным является герметичность уплотнения в условиях изменяющейся частоты вращения. Одним из наиболее неблагоприятных при работе вращающихся валов является период пуска (период начала вращения вала), когда зазор между валом и уплотнением неравномерен по диаметру. Наиболее значительно это проявляется при изношенных беговых дорожках и телах вращения подшипников. Вследствие этого стандартные манжетные уплотнения зачастую недостаточно эффективно уплотняют подшипниковые узлы, и возможно истечение смазочного материала из подшипникового узла через уплотнение. Это приводит к нарушению условий смазывания подшипников и снижению их ресурса. Исходя из данных предпосылок, были проведены исследования по определению критического перепада давлений исследованных уплотнений в зависимости от изменения частоты вращения вала (динамический режим работы). Результаты проведенных исследований представлены на рисунке 4.

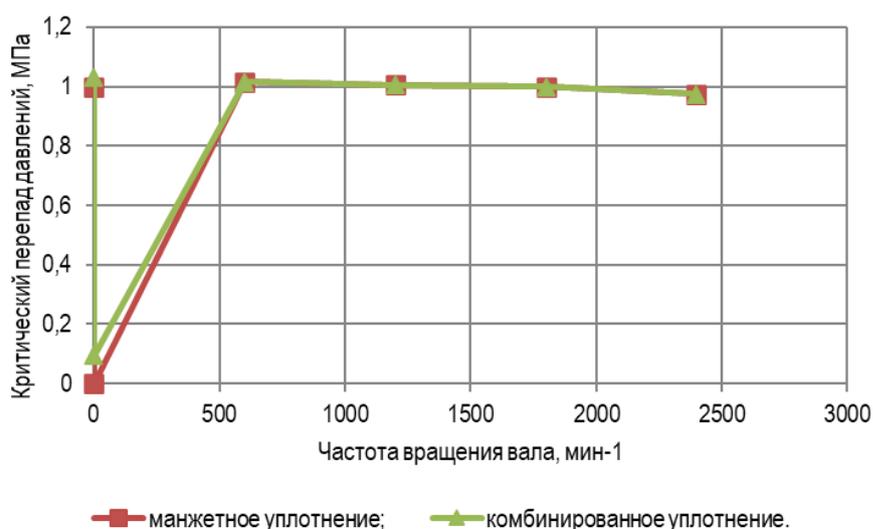


Рис. 4. Зависимость критического перепада давлений в исследованных уплотнениях от частоты вращения вала

Анализ представленных зависимостей показывает, что у манжетного уплотнения прослеживается нарушение герметичности в момент пуска (начала вращения вала подшипникового узла) при частоте вращения ($n \rightarrow 0$), когда происходит утечка рабочей жидкости через уплотнение.

Для комбинированного магнитожидкостного уплотнения при перепаде давлений 0,094 МПа утечки рабочей жидкости из уплотняемого узла не наблюдалось.

При этом конструкция комбинированного уплотнения практически исключает проникновение кварцевых частиц к подшипникам при перепаде давлений до 0,094 МПа и $n \rightarrow 0$.

Таким образом, комбинированное магнитожидкостное уплотнение обладает более высокой герметичностью в момент пуска, по сравнению с традиционно применяемым манжетным, вследствие этого данное уплотнение при работе будет обеспечивать более высокую долговечность подшипников.

Заключение. Полученные результаты позволяют обоснованно подбирать концентрацию магнитных частиц в магнитной жидкости. Получена магнитная жидкость следующего состава: магнетит Fe_3O_4 – 9% масс., карбонильное железо – 26% масс., олеиновая кислота – 25% масс.,

полиэтилсилоксан ПЭС-5 – 40% масс. Проведенные экспериментальные исследования доказывают перспективность замены широко применяемых манжетных уплотнений комбинированными магнитожидкостными уплотнениями.

Библиографический список

1. Терентьев, В. В. Влияние плазмохимической обработки металломезогенных дискотических соединений на их физико-химические характеристики / В. В. Терентьев, О. Б. Акопова, И. К. Наумова, В. А. Титов // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2021. – Т. 21, №1. – С. 61-71. DOI: 10.18083/LCAppl.2021.1.61.
2. Терентьев, В. В. Влияние мезогенной присадки бегената меди на реологические и триботехнические характеристики пластичных смазок / В. В. Терентьев, О. Б. Акопова, И. А. Телегин // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 93-100. DOI: 10.18083/LCAppl.2017.1.93.
3. Терентьев, В. В. Исследование свойств магнитных смазочных материалов / В. В. Терентьев, А. М. Баусов, В. В. Кувшинов, Е. Л. Орешков // Аграрный вестник Верхневолжья. – 2017. – № 4 (21). – С. 96-102.
4. Сайкин М. С. Магнитожидкостные герметизаторы технологического оборудования : монография. – СПб. : Издательство «Лань», 2017. – 136 с.
5. Терентьев, В. В. Исследование свойств магнитных смазочных материалов на основе кремнийорганической жидкости / В. В. Терентьев, А. М. Баусов, М. В. Торопов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – №4(52). – С. 26-32. DOI 10.18286/1816-4501-2020-4-26-32.
6. Терентьев, В. В. Исследование трения в магнитожидкостном уплотнении / В. В. Терентьев, А. М. Баусов, М. В. Торопов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 13-19. DOI 10.12737/42653.
7. Терентьев, В. В. Методика исследования адгезионных свойств магнитных жидкостей / В. В. Терентьев, А. М. Баусов // Научное обозрение. – 2019. – №1. – С. 40-45.

References

1. Terentyev, V. V., Akopova, O. B., Naumova, I. K., & Titov, V. A. (2021). Vliianie plazmohimicheskoi obrabotki metallomezogenykh diskoticheskikh soedinenii na ih fiziko-himicheskie harakteristiki [Influence of plasma-chemical treatment of metallomezogenic discotic compounds on their physico-chemical characteristics]. *Zhidkie kristally i ih prakticheskoe ispol'zovanie – Liquid crystals and their application*, 21, 1, 61-71. DOI: 10.18083/LCAppl. 2021.1.61 [in Russian].
2. Terentyev, V. V., Akopova, O. B., & Telegin, I. A. (2017). Vliianie mezogennoi prisadki begenata medi na reologicheskie i tribotekhnicheskie harakteristiki plastichnykh smazok [Influence of mesogenic pre-precipitation of copper begenate on rheological and tribotechnical characteristics of plastic lubricants]. *Zhidkie kristally i ih prakticheskoe ispol'zovanie – Liquid crystals and their application*, 17, 1, 93-100. DOI: 10.18083/LCAppl. 2017.1.93 [in Russian].
3. Terentyev, V. V., Bausov, A. M., Kuvshinov, V. V., & Oreshkov, E. L. (2017). Issledovanie svoystv magnitnykh smazochnykh materialov [Investigation of the properties of magnetic lubricants]. *Agrarnii vestnik Verhnevolzhia – Agrarian Journal of Upper Volga Region*, 4 (21), 96-102 [in Russian].
4. Saikin, M. S. (2017). Magnitozhidkostnie germetizatori tekhnologicheskogo oborudovaniia [Magnetofluidic seals of production machinery]. Saint Petersburg: Lan Publishing House [in Russian].
5. Terentyev, V. V., Bausov, A. M., & Toropov, M. V. (2020). Issledovanie svoystv magnitnykh smazochnykh materialov na osnove kremniiorganicheskoi zhidkosti [Investigation of the properties of magnetic lubricants based on silicone fluid]. *Vestnik Uliianovskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii – Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*, 4 (52), 26-32. DOI 10.18286/1816-4501-2020-4-26-32 [in Russian].
6. Terentyev, V. V., Bausov, A. M., & Toropov, M. V. (2021). Issledovanie treniia v magnitozhidkostnom uplotnenii [Investigation of friction in ferrofluidic seal]. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii – Bulletin Samara state agricultural academy*, 6, 1, 13-19. DOI 10.12737/42653 [in Russian].
7. Terentyev, V. V., & Bausov, A. M. (2019). Metodika issledovaniia adgezionnykh svoystv magnitnykh zhidkosteii [Method of investigation of adhesive properties of magnetic fluid]. *Nauchnoe obozrenie – Scientific Review*, 1, 40-45 [in Russian].