

# ТЕХНОЛОГИИ, СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

DOI

УДК 62-762.89

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ В МАГНИТОЖИДКОСТНОМ УПЛОТНЕНИИ

**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:** жидкость, трение, вязкость, индукция, долговечность.

*Цель исследований – повышение долговечности подшипниковых узлов за счет применения магнитожидкостных уплотнений с улучшенными триботехническими характеристиками. Исследование динамической вязкости магнитной жидкости проводилось на реовискозиметре Хелплера. Исследование момента трения в магнитожидкостном уплотнении осуществлялось на экспериментальной установке оригинальной конструкции. Состав магнитной жидкости – полиэтилсилоксан ПЭС-5 (65% масс.), магнетит  $Fe_3O_4$  (10% масс.), олеиновая кислота (25% масс.). Намагниченность насыщения магнетита составляла 40 кА/м. Экспериментально определено, что при повышении температуры с минус 5°C до плюс 95°C динамическая вязкость магнитной жидкости снижается в 1,87 раза, что свидетельствует о высокой термической стабильности. Отмечен рост момента трения в магнитожидкостном уплотнении в 27,7 раз при увеличении частоты вращения вала с 400 до 2000 мин<sup>-1</sup> и величины магнитной индукции с 0,4 до 1,0 Тл. Рост момента трения связан с увеличением структурной составляющей момента трения при увеличении силы межчастичных взаимодействий в магнитной жидкости за счет увеличения градиента магнитного поля. Отмечено, что наиболее низкое значение момента трения наблюдается при частоте вращения вала до 1300 мин<sup>-1</sup> при индукции магнитного поля до 0,6-0,7 Тл. Сравнительные эксплуатационные испытания модернизированного и стандартного подшипниковых узлов вала отбора мощности Беларус-826 свидетельствуют о повышении наработки на отказ узла в 1,6 раза. Полученные результаты позволяют обоснованно подбирать магнитную систему при проектировании эффективных магнитожидкостных уплотнений для различных подшипниковых узлов, выбирать скоростной режим их эксплуатации.*

## INVESTIGATION OF FRICTION IN MAGNETIC FLUID SEAL

**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.

**Keywords:** fluid, friction, viscosity, induction, durability.

The purpose of the research is increasing the durability of bearing assemblies via use of magnetic-liquid seals with improved tribotechnical characteristics. Hepler rheoviscosimeter was used for dynamic viscosity study. The friction torque study in the magnetic-liquid seal was carried out on an experimental installation of the original design. The magnetic liquid was comprised of polyethylsiloxane PES-5 (65% by weight), magnetite  $Fe_3O_4$  (10% by weight), oleic acid (25% by weight). Saturation magnetization of the magnetite amounted to 40 kA/m. It is experimentally determined that when the temperature increases from minus 5°C to plus 95°C, the dynamic viscosity of the magnetic fluid decreases by 1.87 times, which indicates high thermal stability. An increase in the friction torque of the magnetic-liquid seal was noted by 27.7 times with an increase in the shaft rotation speed from 400 to 2000  $min^{-1}$  and the magnetic induction value from 0.4 to 1.0 Tl. The growth of the friction torque is associated with the increase in the structural component of the friction torque while increasing the strength of particle interactions in a magnetic fluid due to the lift of the magnetic field gradient. It was noted that the lowest value of the friction torque was observed at the shaft rotation speed up to 1300  $min^{-1}$ , at the magnetic field induction up to 0,6-0,7 Tl. Comparative operational tests of the upgraded and standard bearing units of the Belarus-826 power take-off shaft indicate an increase in the node time to failure by 1.6 times. The results obtained lead to reasonable selection of magnetic system when designing effective magnetic-liquid seals for various bearing units, and speed mode of their operation.

Одной из причин снижения эффективности использования сельскохозяйственной техники является недостаточно высокая надежность применяемых подшипниковых узлов. Основной причиной выхода из строя подшипника является нарушение его герметичности, приводящее к удалению смазочного материала из зоны контакта «тело качения – обойма подшипника». Результатом этого является повышенное трение в зоне контакта, рост температуры и, в конечном счете, заклинивание подшипника, приводящее к отказу машины. Для улучшения условий трения в подшипниковых узлах применяются различные присадки и добавки к смазочным материалам. Одним из перспективных направлений является применение в качестве антифрикционных и противоизносных компонентов смазочного материала жидкокристаллических соединений металлмезогенного типа [1-4]. Данные соединения имеют возможность менять свою ориентацию при наложении электромагнитных полей. Другим, не менее перспективным, направлением является использование магнитных смазочных материалов, которые можно использовать как в качестве смазочного материала, так и в качестве уплотнительного материала [5, 6].

В настоящее время ввиду простоты конструкции и дешевизны для уплотнения подшипниковых узлов широко применяются резиновые манжетные уплотнения различного конструктивного исполнения. Однако вследствие повышенного трения в контактной зоне манжеты и вала и влияния различных внешних факторов данные уплотнения зачастую отличаются невысоким ресурсом. Одним из конструктивных путей повышения долговечности подшипниковых узлов является применение магнитожидкостных уплотнений.

Магнитожидкостные уплотнения находят все более широкое применение в машиностроении. В отличие от традиционных манжетных уплотнений за счет применения магнитных жидкостей в качестве уплотнительного материала в процессе работы трение между манжетой и валом заменяется на трение между магнитной жидкостью и валом. Это приводит к значительному снижению момента трения и износу уплотняемого вала. При этом в зависимости от величины напряженности магнитного поля изменяется величина помпдемоторной силы, которая удерживает жидкость в уплотнении.

**Цель исследований** – повышение долговечности подшипниковых узлов за счет применения магнитожидкостных уплотнений с улучшенными триботехническими характеристиками.

**Задача исследований** – исследовать динамическую вязкость магнитной жидкости и момент трения магнитожидкостного уплотнения в зависимости от изменения эксплуатационных параметров работы (частоты вращения вала, температуры, магнитной индукции).

**Материалы и методы исследований.** Исследование динамической вязкости и термической устойчивости магнитной жидкости осуществлялось на реовискозиметре Хепплера.

Принцип работы реовискозиметра основан на определении скорости движения стеклянного шара в стеклянном цилиндре при заданной нагрузке. Динамическая вязкость при этом определялась согласно формуле:

$$\eta = k \cdot F \cdot t \cdot c / \pi \cdot a^2 \cdot h, \quad (1)$$

где  $k$  – безразмерная постоянная, зависящая от соотношения радиусов шара и цилиндра;

$F$  – нагрузка на шар, Н;

$t$  – время погружения шара в жидкость, с;

$c$  – ширина зазора между шаром и цилиндром, с;

$a$  – радиус шара, м;

$h$  – глубина погружения, определяемая по индикатору, м.

Для оценки триботехнических характеристик в исследованиях определялся момент трения. Момент трения в магнитожидкостном уплотнении определялся на экспериментальной установке оригинальной конструкции.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

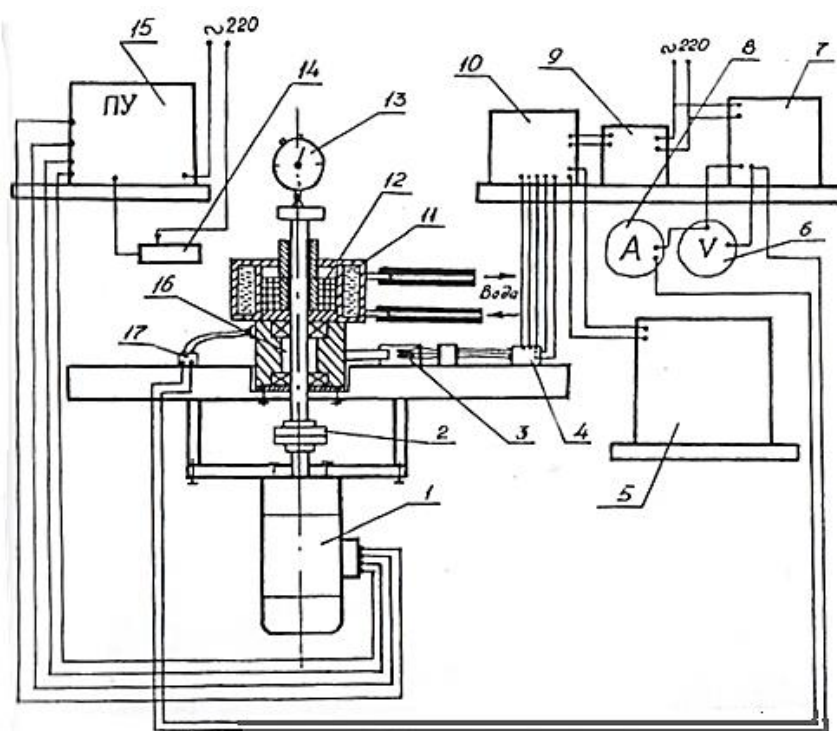


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения момента трения:

- 1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – тензодатчик; 4 – полумост; 5 – прибор самопишущий; 6 – вольтметр; 7 – ЛАТР;
- 8 – амперметр; 9 – блок питания регулируемый; 10 – прибор для измерения крутящего момента;
- 11 – камера охлаждающая; 12 – катушка электромагнитная; 13 – тахометр; 14 – реостат балластный;
- 15 – пульт управления; 16 – узел подшипниковый; 17 – мост диодный

Определение момента трения в магнитожидкостном уплотнении осуществлялось по следующей методике. Первоначально открывался вентиль водопроводной сети и камера охлаждающая 11 установки заполнялась водой. Далее в электромагнитной катушке 12 устанавливался ток, соответствующий величине индукции магнитного поля.

Исследуемый подшипниковый узел 16 заполнялся магнитной жидкостью. Далее включался приводной электродвигатель 1 установки. С помощью балластного реостата 14 устанавливалась частота вращения вала исследуемого подшипникового узла от 400 до 2000 мин<sup>-1</sup>. Диапазон частот вращения вала подшипников узла был выбран исходя из средних скоростных параметров подшипников, используемых в подшипниковых узлах сельскохозяйственного оборудования.

Контроль частоты вращения вала установки осуществлялся с помощью тахометра 13. Момент трения на валу подшипников узла равен крутящему моменту. Последний измерялся с помощью прибора 10. Для определения величины крутящего момента использовались два тензодатчика 3,

наклеенные на балку, конец которой жестко закреплен на неподвижной платформе. Сигнал разбаланса тензомоста, в который включены тензодатчики 3, как результат интегрирования выдавался на прибор 10. Показания также записывались на прибор самопишущий.

На цифровом табло прибора для измерения крутящего момента 10 отображался интегрированный крутящий момент, который измерялся на валу подшипникового узла 16 экспериментальной установки. За критерий количественной оценки принималась величина крутящего момента, при котором проводились испытания магнитожидкостного уплотнения.

На основе проведенных ранее исследований [7], был выбран состав магнитной жидкости. В качестве исследуемой магнитной жидкости использовалась магнитная жидкость следующего состава: полиэтилсилоксан ПЭС-5 (65% масс.), магнетит  $Fe_3O_4$  (10% масс.), олеиновая кислота (25% масс.). Намагниченность насыщения магнетита составляла 40 кА/м.

**Результаты исследований.** Известно, что при помещении магнитной жидкости в неоднородное магнитное поле на нее действует сила, обусловленная градиентом магнитного поля, которая в случае равномерного движения равна силе Стокса [8]:

$$F_c = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot v, \quad (2)$$

где  $F_c$  – сила сопротивления внешней среды при равномерном движении частицы, Н;

$r$  – радиус частицы, м;

$\eta$  – вязкость жидкости носителя, Па·с;

$v$  – скорость дрейфа магнитных частиц, м/с.

Согласно исследованиям, представленным в работе [8], скорость дрейфа частиц определится согласно зависимости:

$$v = 2 \cdot r^3 \cdot I_m \cdot G / 9 \cdot r_m \cdot \eta, \quad (3)$$

где  $I_m$  – намагниченность насыщения магнетита, кА/м;

$G$  – градиент индукции магнитного поля, Тл/м;

$r_m$  – радиус магнитного зерна частицы, м.

Таким образом, видно, что сила сопротивления внешней среды и скорость дрейфа магнитных частиц напрямую зависят от двух основных факторов, а именно – вязкости жидкости носителя и индукции магнитного поля. В свою очередь вязкость жидкости носителя напрямую зависит от её температуры.

Существует температура, при которой скорость дрейфа магнитных частиц повышается настолько, что происходит расслоение магнитной жидкости и нарушение работы магнитожидкостного уплотнения.

На рисунке 2 представлены результаты определения динамической вязкости исследуемой магнитной жидкости.

Из представленных данных (рис. 2) видно, что при повышении температуры с минус 5<sup>0</sup>С до плюс 95<sup>0</sup>С динамическая вязкость снижается в 1,87 раза, что свидетельствует о высокой термической стабильности исследуемой магнитной жидкости. При этом данная термическая стабильность характерна в течение продолжительного времени. Повышение температуры в подшипниковом узле во многом определяется ростом частоты вращения вала. Кроме этого из формулы (3) видно, что увеличение индукции магнитного поля также способствует ускорению скорости дрейфа ферромагнитных частиц. Это в свою очередь приводит к изменению триботехнических характеристик в зоне контакта магнитной жидкости с уплотняемым валом. Вследствие этого в рамках проведенных исследований определялось влияние частоты вращения вала и величины индукции магнитного поля на момент трения в магнитожидкостном уплотнении. На рисунке 3 представлены результаты проведенных исследований.

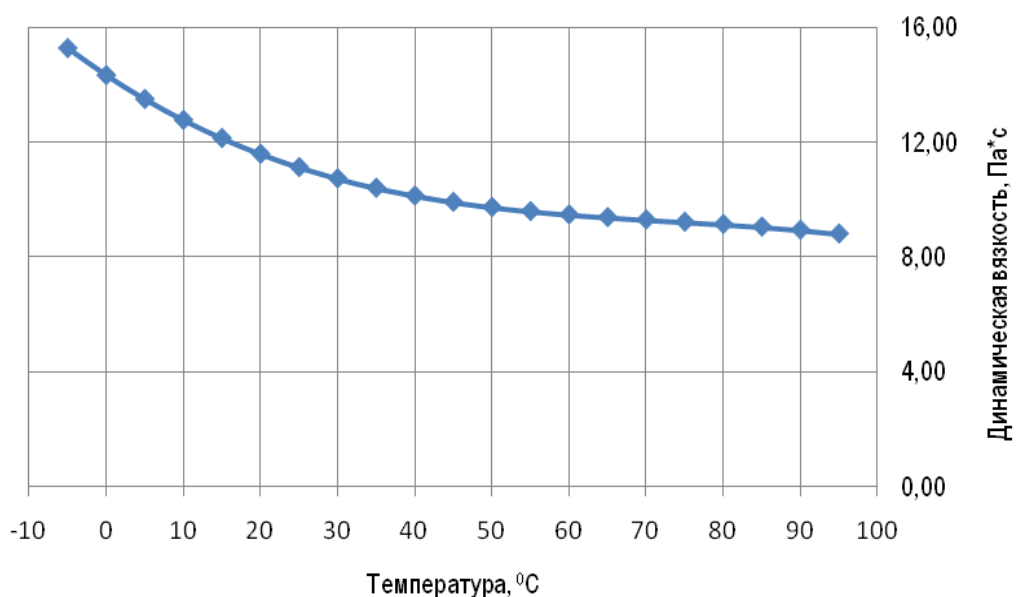


Рис. 2. Результаты определения динамической вязкости магнитной жидкости

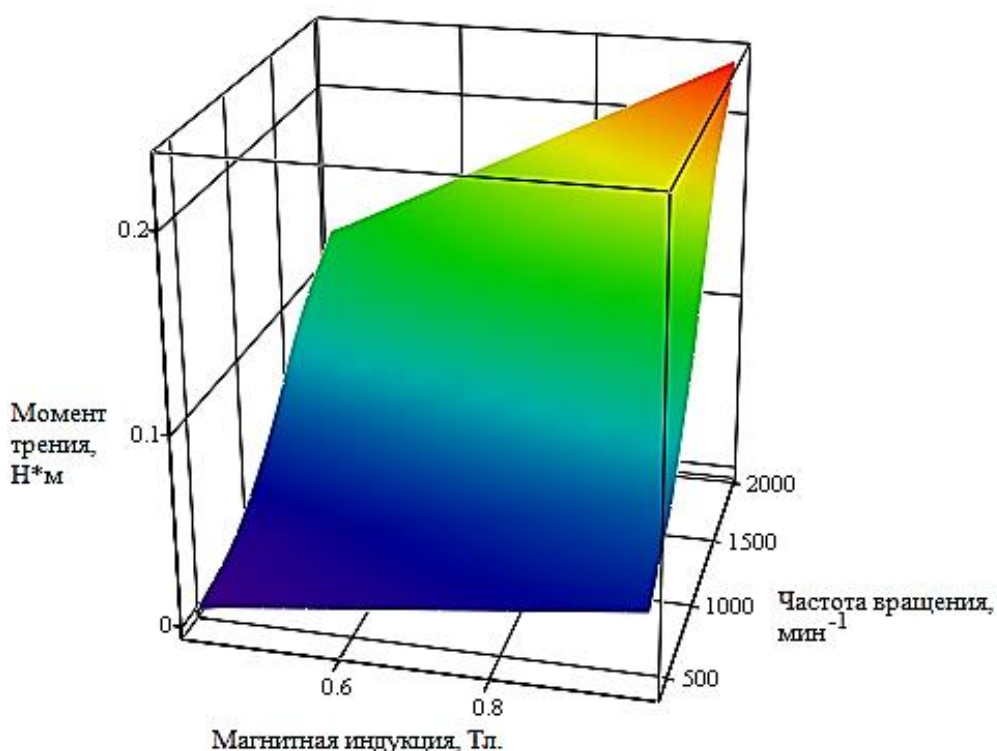


Рис. 3. Результаты определения момента трения в магнитожидкостном уплотнении

Анализируя влияние частоты вращения вала в подшипниковом узле и индукции магнитного поля на момент трения в магнитожидкостном уплотнении, можно отметить, что с ростом частоты вращения вала и индуктивности магнитного поля происходит возрастание момента трения. Момент трения возрастает в 27,7 раза при увеличении частоты вращения вала с 400 до 2000 мин<sup>-1</sup> и величины магнитной индукции с 0,4 до 1,0 Тл.

Рост момента трения связан с увеличением структурной составляющей момента трения при увеличении силы межчастичных взаимодействий в магнитной жидкости за счет увеличения градиента магнитного поля. Такие изменения момента трения при дальнейшей работе магнитожидкостного

уплотнения приводят к увеличению мощности механических потерь и ускоренному износу уплотняемого вала.

Как показали проведенные исследования (рис. 3), для работы магнитожидкостного уплотнения с исследованной магнитной жидкостью наиболее низкое значение момента трения наблюдается при частоте вращения вала до  $1300 \text{ мин}^{-1}$ , при индукции магнитного поля до  $0,6-0,7 \text{ Тл}$ . При данных параметрах также наблюдалось самое низкое значение интенсивности изнашивания вала.

По результатам исследований было изготовлено магнитожидкостное уплотнение подшипникового узла вала отбора мощности трактора Беларус-826.

Схема магнитожидкостного уплотнения представлена на рисунке 4.

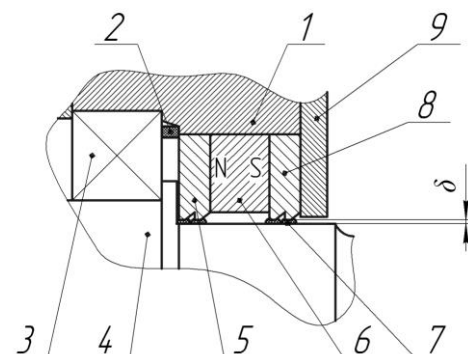


Рис. 4. Схема магнитожидкостного уплотнения:

1 – крышка; 2 – втулка; 3 – подшипник; 4 – вал; 5, 8 – полюсные приставки; 6 – постоянный магнит; 7 – магнитная жидкость; 9 – пластина

Характеристики магнитожидкостного уплотнения следующие: марка постоянного магнита – 25БА170 ГОСТ 24063-80 (феррито-бариевый), материал полюсных приставок – сталь 10 ГОСТ 1050-2013, рабочий зазор  $\delta=0,25 \text{ мм}$ .

В дальнейшем были проведены сравнительные эксплуатационные испытания модернизированного и стандартного подшипниковых узлов. Вал отбора мощности работал при частоте вращения  $1000 \text{ мин}^{-1}$ .

Сравнительные эксплуатационные испытания модернизированного и стандартного подшипниковых узлов свидетельствуют о повышении наработки на отказ узла в 1,6 раза.

**Заключение.** Полученные результаты позволяют обоснованно подбирать магнитную систему при проектировании эффективных магнитожидкостных уплотнений для различных подшипниковых узлов, выбирать скоростной режим их эксплуатации.

#### Библиографический список

1. Терентьев, В. В. Повышение износостойкости трибосопряжений сельскохозяйственной и автотракторной техники путем совершенствования смазочных материалов / В. В. Терентьев, И. А. Телегин, В. В. Рябинин // Известия Международной академии аграрного образования. – 2017. – № 35. – С. 151-157.
2. Терентьев, В. В. Модель изменения коэффициента трения металлических поверхностей в присутствии модифицированных пластичных смазочных материалов / В. В. Терентьев, Н. В. Боброва, О. Б. Аكوпова [и др.] // Аграрный вестник Верхневолжья. – 2016. – №2 (14). – С. 40-45.
3. Терентьев, В. В. Спектральные свойства карбоксилатов меди и опыт их применения в узлах трения сельскохозяйственной техники / В. В. Терентьев, О. Б. Аكوпова, И. А. Телегин [и др.] // Аграрный вестник Верхневолжья. – 2019. – № 1 (26). – С. 79-84.
4. Ельникова, Л. В. Диэлектрические свойства смазочных композиций на основе солидола с присадками мезогенных карбоксилатов меди / Л. В. Ельникова, А. Т. Пономаренко, В. Г. Шевченко [и др.] // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2019. – Т.19, №1. – С.70-78.
5. Терентьев, В. В. Методика исследования адгезионных свойств магнитных жидкостей / В. В. Терентьев, А. М. Баусов // Научное обозрение. – 2019. – №1. – С. 40-45.

6. 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.
7. 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.
8. Сайкин, М. С. Магнитоожидкостные герметизаторы технологического оборудования : монография. – СПб. : Издательство «Лань», 2017. – 136 с.

#### References

1. Terentyev V. V., Telegin I. A., & Ryabinin V. V. (2017). Povishenie iznosostoikosti tribosopriazhenii seliskohozyaistvennoi i avtotraktornoi tekhniki putem sovershenstvovaniia smazochnykh materialov [Increase of wear resistance of friction units of agricultural and automotive vehicles by improving lubricating materials]. *Izvestiia Mezhdunarodnoi akademii agrarnogo obrazovaniia – Izvestia MAAO*, 35, 151-157 [in Russian].
2. Terentyev V. V., Bobrova N. V., Akopova O. B., Bausov A. M., Telegin I. A., & Ryabinin V. V. (2016). Model izmeneniia koeffitsienta treniia metallicheskih poverhnostei v prisutstvii modifitsirovannykh plastichnykh smazochnykh materialov [Model of metal surfaces friction coefficient change under the modified plastic lubricants]. *Agrarii vestnik Verhnevolzhiiia – Agrarian Journal of Upper Volga Region*, 2 (14), 40-45 [in Russian].
3. Terentiev, V. V., Akopova, O. B., Telegin, I. A., Elnikova, L. V., & Parunova, Yu. M. (2019). Spektralnie svoistva karboksilatov medi i opyt ih primeneniia v uzlah treniia seliskohoziaistvennoi tekhniki [Spectral properties of copper carboxylates and their application in friction units of agricultural machinery]. *Agrarii vestnik Verhnevolzhiiia – Agrarian Journal of Upper Volga Region*, 1 (26), 79-84 [in Russian].
4. Elnikova, L. V., Ponomarenko, A. T., Shevchenko, V. G., Terentyev, V. V., & Akopova, O. B. (2019). Dielektricheskie svoistva smazochnykh kompozitsii na osnove solidola s prisadkami mezogennykh karboksilatov medi [Dielectric properties of solidol-based lubricant compositions with discotic metal-mesogenic additives]. *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie – Liquid Crystals and their Application*, 19, 1, 70-78 [in Russian].
5. Terentyev, V. V., & Bausov, A. M. (2019). Metodika issledovaniia adgezionnykh svoistv magnitnykh zhidkostei [Magnetic liquids adhesion properties studying methodology]. *Nauchnoe obozrenie – Scientific Review*, 1, 40-45 [in Russian].
6. Terentyev, V. V., Bausov, A. M., Kuvshinov, V. V., & Orshkov, E. L. (2017). Issledovanie svoistv magnitnykh smazochnykh materialov Properties study of magnetic of lubricants]. *Agrarii vestnik Verhnevolzhiiia – Agrarian Journal of Upper Volga Region*, 4 (21), 96-102 [in Russian].
7. Terentyev, V. V., Bausov, A. M., & Toropov, M. V. (2020). Issledovanie svoistv magnitnykh smazochnykh materialov na osnove kremniorganicheskoi zhidkosti [Research of properties of magnetic lubricants based on organosilicon liquid]. *Vestnik Uliianovskoi gosudarstvennoi seliskokhoziaistvennoi akademii – Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*, 4 (52), 26-32, DOI 10.18286/1816-4501-2020-4-26-32 [in Russian].
8. Saikin, M. S. (2017). Magnitozhidkostnie germetizatori tekhnologicheskogo oborudovaniya [Magnetic fluid seals for technological equipment]. Saint Petersburg: LanPublishingHouse [in Russian].