Исследование влияния добавок на трибологические характеристики смазочного материала и морфологию поверхностей трения

Валентин Владимирович Сафонов¹, Сергей Александрович Шишурин¹, Вадим Викторович Венский¹,
Константин Валентинович Сафонов², Валерий Васильевич Остриков³

¹Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Россия.

²ООО «Мировая техника», г. Саратов, Россия.

³Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Россия.
e-mail: s.shishurin@gmail.com

Аннотация. В настоящее время особое внимание уделяется вопросам повышения износостойкости поверхностных слоев материала трущихся деталей и снижения энергетических затрат на трение. Сформировать поверхностные пленки с высокими трибологическими свойствами можно путем введения в базовое масло разнообразных металлосодержащих добавок, которые в зависимости от конструкторско-технологических особенностей пары трения и условий эксплуатации могут существенно различаться. С целью изучения механизма действия разноплановых добавок к маслам с точки зрения формирования поверхностных слоев с эффективными эксплуатационными свойствами определяли трибологические свойства экспериментальных смазочных композиций и исследовали морфологию поверхностей трения деталей машин. Для проведения сравнительных испытаний в качестве образцов были выбраны следующие добавки – MOTOR DOKTOR (MANNOL) и металлоплакирующая добавка Кластер. В результате проведенных лабораторных трибологических испытаний образцов трения на чистом масле МС-20 и с содержанием трибопрепаратов MANNOL (MOTOR DOKTOR) и Кластер было установлено, что использование нанодобавки Кластер привело к снижению момента трения на 80 % по сравнению с добавкой MANNOL (MOTOR DOKTOR) и в 1,48 раза по сравнению с маслом МС-20. Износ колодки модельной пары трения работающей на масле МС-20 с добавкой Кластер, за время испытания, уменьшился в 3 раза по сравнению с износом на масле МС-20 с добавкой MANNOL (MOTOR DOKTOR) и в 26 раз по сравнению с базовым маслом МС-20. На рабочих участках поверхностей трения модельных образцов после их работы на масле МС-20 с добавками MANNOL (MOTOR DOKTOR) и Кластер наблюдается образование пленок различной природы и вторичных структур, которые проявляются специфическим строением рельефа. **Ключевые слова:** надежность; нанодобавки в масло; трибологические характеристики; износостойкость; образцы трения; износ; поверхностный слой; момент трения; морфология поверхности; вторичные структуры; поверхностная пленка.

Для цитирования: Сафонов В. В., Шишурин С. А., Венский В. В., Сафонов К. В., Остриков В. В. Исследование влияния добавок на трибологические характеристики смазочного материала и морфологию поверхностей трения // Аграрный научный журнал. 2022. № 1. С. 88–92. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i1pp88-92>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Research the effect of additives on tribological characteristics of lubricant material and morphology of friction surfaces

Valentin V. Safonov¹, Sergey A. Shishurin¹, Vadim V. Venskaitis¹, Konstantin V. Safonov², Valeriy V. Ostrikov³

¹Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia.

²ООО “Mirovaya Tekhnika”, Saratov, Russia

³All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Oil Products in Agriculture, Tambov, Russia

e-mail: s.shishurin@gmail.com.

Abstract. At present, special attention is paid to the issues of increasing the wear resistance of the surface layers of the material of rubbing parts and reducing the energy consumption for friction. It is possible to form surface films with high tribological properties by introducing various metal-containing additives into the base oil, which, depending on the design and technological features of the friction pair and operating conditions, can differ significantly. In order to study the mechanism of action of various additives to oils from the point of view of the formation of surface layers with effective operational properties, the tribological properties of experimental lubricating compositions were determined and the morphology of the friction surfaces of machine parts was investigated. For comparative tests, the following additives were chosen as samples - MOTOR DOKTOR (MANNOL) and the metal-cladding additive Cluster. As a result of laboratory tribological tests of friction samples on pure MS-20 oil and containing tribological preparations MANNOL (MOTOR DOKTOR) and Cluster, it was found out that the use of the Cluster nanoadditive led to a decrease in the friction moment by 80% in comparison with the additive MANNOL (MOTOR DOKTOR) and 1.48 times compared to MS-20 oil. During the test, the wear of the pad of the model friction pair operating on MS-20 oil with the Cluster additive decreased by 3 times compared to the wear on MS-20 oil with the MANNOL additive (MOTOR DOKTOR) and 26 times compared to the base oil MS-20. On the working areas of the friction surfaces of the model samples after their operation on MS-20 oil with MANNOL (MOTOR DOKTOR) and Cluster additives, the formation of films of various nature and secondary structures is observed, which are manifested by a specific relief structure.

Keywords: reliability; nano-additives in oil; tribological characteristics; wear resistance; friction samples; wear; surface layer; friction moment; surface morphology; secondary structures; surface film.

For citation: Safonov V. V., Shishurin S. A., Venskaitis V. V., Safonov K. V., Ostrikov V. V. Optimization of the diameter of the suction holes of the vacuum seeding device. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2022;(1):88–92. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i1pp88-92>.

Введение. Постоянно растущие требования к качеству производимой автотракторной и сельскохозяйственной техники определяют потребность увеличения их производительности, надежности и коэффициента полезного действия. Данные параметры зависят от эксплуатационных свойств деталей и узлов техники (усталостная прочность, прочность сопряжений, износостойкость и коэффициент трения, контактная жесткость, коррозионная стойкость, плотность соединений и др.).

© Сафонов В.В., Шишурин С.А., Венский В.В., Сафонов К.В., Остриков В.В., 2022

Известно, что до 80 % отказов автотракторной и сельскохозяйственной техники при эксплуатации связано с износами сопряжений пар трения [1].

Износ пар трения технических объектов происходит в результате разрушения поверхностного слоя. В этом слое, из-за взаимодействия сопрягающихся поверхностей, возникают усталостные и физико-химические изменения.

В свою очередь на взаимодействие трущихся сопряжений автотракторной и сельскохозяйственной техники существенное влияние оказывает: контактная жесткость, фактическая площадь касания, величина локальных напряжений, адгезия смазок и покрытий, а также прочие показатели, от которых зависит работоспособность машин [2, 3].

Так как при трении большая часть работы переходит в тепло, то поверхностный слой деталей автотракторной и сельскохозяйственной техники подвержен нагреву, а также находится в напряженном состоянии.

Установлено, что в тяжело нагруженных узлах трения температура в контактных зонах достигает очень высоких значений (до 1000 °C и выше), что приводит к расплавлению металлических и разложению неметаллических материалов [4]. Под действием этих факторов, а также за счет воздействия окружающей и смазочной среды на рабочие поверхности сопряжений происходят самые различные преобразования поверхностного слоя металла трущихся деталей.

В настоящее время приоритет отдается изучению микроструктур и морфологии слоев трения, кинетике пластического деформирования и разрушения поверхности, природе сил трения и механизмов изнашивания. Особое внимание уделяется вопросам повышения износостойкости поверхностных слоев материала трущихся деталей и снижения энергетических затрат на трение.

Особый интерес представляют присадки, предназначенные для улучшения смазочных свойств масел.

Сформировать поверхностные пленки с высокими трибологическими свойствами можно путем введения в базовое масло разнообразных металлосодержащих присадок, которые в зависимости от конструкторско-технологических особенностей пары трения и условий эксплуатации могут существенно различаться.

Активные органические компоненты смазочных композиций либо находятся в масле в готовом виде, либо образуются в процессе его трибодеструкции.

В последние годы, как за рубежом, так и в России в качестве противоизносных и антифрикционных присадок к маслам применяются молибденсодержащие комплексные соединения.

Например, присадка в моторное масло MANNOL, производства SCT GERMANY, представляет собой стабильную коллоидную дисперсию натурального дисульфида молибдена (MoS_2) в базовом масле. Образует на поверхности трения деталей прочную слоистую пленку с высокими антифрикционными и противоизносными свойствами.

Механизм действия дисульфида молибдена основан на особенности строения его кристалла. В дисульфиде молибдена каждый атом $\text{Mo}^{(IV)}$ находится в центре тригональной призмы и окружен шестью атомами серы. Тригональная призма ориентирована так, что в кристалле атомы молибдена находятся между двумя слоями атомов серы. Из-за слабых ван-дер-ваальсовых сил взаимодействия между атомами серы в MoS_2 слои могут легко скользить друг относительно друга, что и приводит к появлению смазочного эффекта.

Кроме дисульфида молибдена широкое распространение в качестве присадок к маслу и консистентным смазкам получили соединения меди, олова, кобальта, свинца, никеля и др. [5–9], то есть тех металлов, использование которых в чистом виде также приводит к улучшению трибологических характеристик основы.

Среди них особое место занимают добавки, содержащие порошки чистых металлов и сплавов. Так известно, что механизм действия маслорастворимых металлосодержащих добавок в смазочной среде основывается на разложении в зоне контакта трущихся сопряжений оксидов, солей, металлоорганических и других комплексных соединений с выделением металла и образованием кислотных и щелочных остатков. Полученные остатки отличаются повышенными коррозионными свойствами и способствуют интенсивному разрушению структуры базового масла. Особой эффективностью отличаются добавки, содержащие наноразмерные частицы перечисленных металлов и их сплавов. К ним можно отнести следующие нанодобавки, относящиеся к классу реметализантов: Римет, Ресурс, Супермет, Кластер и др. [10–12].

С целью изучения механизма действия разноплановых добавок к маслам с точки зрения формирования поверхностных слоев с эффективными эксплуатационными свойствами определяли трибологические свойства экспериментальных смазочных композиций и исследовали морфологию поверхностей трения деталей машин.

Методика исследований. Для проведения сравнительных испытаний, в качестве образцов были выбраны следующие добавки – MOTOR DOKTOR (MANNOL) и металлоплакирующая добавка Кластер.

Назначение данных добавок аналогичное. Согласно инструкции к применению, они предназначены для повышения компрессии и давления масла, снижения его расхода особенно в изношенных двигателях. Кроме того, предназначены для снижения износа деталей двигателя и увеличения его ресурса. Они образуют на поверхности трущихся деталей надежную смазочную пленку, обеспечивающую безопасную работу двигателя в тяжелых условиях.

Основным компонентом добавки MANNOL (MOTOR DOKTOR) является молибден.

В состав нанодобавки Кластер входит наноразмерный порошок латуни, легированный фосфором и серой, а также ультрадисперсный порошок полититаната калия. Наноразмерный порошок латуни был получен методом плазменной перекомденсации. Данный метод основан на испарении крупнодисперсного порошка (сырья) или прутка исходного металла в плазменном потоке с температурой 5000–6000 °C и конденсации пара до наноразмерной величины. Полученные таким образом частицы характеризовались следующими параметрами: размер частиц – 0,01...0,03 мкм, удельная поверхность – 100...150 м²/г [12, 13].

Порошок полититаната калия представляет собой соединения с общей химической формулой $\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{TiO}_2$ и является новым видом функциональных материалов, используемых в различных направлениях техники, в том числе и в смазочных материалах [14, 15].

Полититанат калия имеет слоистую структуру, аналогичную структуре дисульфида молибдена. Слои материала сформированы титан-кислородными октаэдрами, в пространстве между которыми расположены ионы калия. Содержание адсорбированной и структурной влаги составляет 3–5 вес. %. Чешуйчатые кристаллы полититаната калия имеют толщину 50–60 нм и размер плоскости 200–600 нм.

Для повышения седиментационной устойчивости наноразмерного порошка в смазочной среде проводили его обработку специальным ПАВ.

Рассматриваемые нанопрепараты добавляли рекомендуемой концентрацией в масло МС-20.

Испытаниям подвергали три варианта смазочных материалов: масло МС-20 (ГОСТ 21743-76), МС-20 с добавкой MANNOL (MOTOR DOKTOR) и МС-20 с добавкой Кластер.

Сравнительные трибологические испытания проводили на машине трения СМЦ-2 при следующих условиях: нагрузка 1,5 кН, частота вращения 500 мин⁻¹, продолжительность испытания 3 ч.

Эффективность сравниваемых надобавок к маслу МС-20 оценивали в ходе проведения сравнительных трибологических лабораторных испытаний.

Трибологические свойства испытуемых составов и масла МС-20 исследовали с использованием модельной пары трения «ролик – колодка», позволяющей имитировать работу ресурсопределяющего трибосопряжения ДВС – «поршневое кольцо – гильза». Элементы модельного трибосопряжения изготавливали из серого чугуна СЧ-25 (ГОСТ 1412-85) одной плавки. Твердость соответствовала твердости поверхности гильзы цилиндра (190...220 НВ). Наружный диаметр ролика – 50 мм, ширина – 12 мм. Колодки изготавливали из кольца с наружным диаметром 68 мм, внутренний диаметр которого шлифовали под размер ролика. Шероховатость рабочей поверхности Ra ролика и колодки после механической обработки соответствовала 0,32 и 0,63 мкм. Коэффициент взаимного перекрытия образцов – 0,13.

Перед испытаниями детали модельных трибосопряжений прирабатывали на масле МС-20 в течение 3 ч на испытательных режимах. Смазку образцов осуществляли погружением нижнего ролика на 1/3 диаметра в смазочную ванну объемом 150 см³. Нагрузку на ролики увеличивали от 0 до величины испытательной нагрузки ступенчато по 0,25 кН. Продолжительность работы на каждой ступени нагружения составила 0,5 ч. Нагрузку изменяли при помощи нагрузочного устройства, установленного на машине трения. Критерием окончания приработки служила стабилизация момента трения при определенной нагрузке.

После окончания приработки детали промывали в бензине-растворителе «Калоша» (ГОСТ 443-76), высушивали на воздухе в течение 24 ч и взвешивали на аналитических весах HR – 250 AZG с точностью до 0,1 мг.

Приработанные элементы модельных трибосопряжений устанавливали на машину трения и проводили испытания исследуемых смазочных материалов. Эффективность сравниваемых наноконпозиционных добавок оценивали по значениям момента трения, возникающего в трибосопряжении «ролик–колодка», износа колодок и температуры поверхности трения роликов. Момент трения регистрировался непрерывно при помощи пишущего устройства узла замера машины трения. Износ определяли весовым методом на аналитических весах HR – 250 AZG, а температуру фиксировали прибором – инфракрасным термометром MS6530.

После трибологических испытаний проводили исследования морфологии поверхностей трения деталей сформированных под действием сравниваемых смазочных композиций.

Исследования проводили с помощью металлографического микроскопа ЛабоМет – 4.

Результаты исследований. Результаты испытаний представлены на рис. 1, 2.

Анализ представленных на рис. 1 зависимостей показал, что использование смазочной композиции на основе добавок MANNOL (MOTOR DOKTOR) и Кластер приводит к снижению значений момента трения в контакте элементов модельной пары трения «ролик–колодка» по сравнению с результатами испытаний масла МС-20.

Применение нанодобавки Кластер привело к снижению момента трения на 80 % по сравнению с добавкой MANNOL (MOTOR DOKTOR) и в 1,48 раза по сравнению с маслом МС-20.

Величина температуры, генерируемой в зоне трения, является одним из важных показателей, характеризующих антифрикционные свойства смазочного материала. Температура поверхности трения ролика в ходе испытаний масла МС-20 с нанодобавкой Кластер в конце испытаний составила 112 °С, в то время как с добавкой MANNOL (MOTOR DOKTOR) – 122 °С, а на масле МС-20 – 151 °С.

По результатам износных испытаний построены гистограммы, представленные на рис. 2.

Их анализ показал, что внесение в масло МС-20 добавки Кластер позволяет не только существенно улучшить его противозносные свойства по сравнению с базовым маслом МС-20, но и по сравнению со смазочной композицией содержащей добавку MANNOL (MOTOR DOKTOR). Так, износ колодки модельной пары трения, работающей на масле МС-20 с добавкой Кластер, за 3 ч испытаний составил 0,0002 г, а на смазочной композиции, состоящей из смеси масла МС-20 с добавкой MANNOL (MOTOR DOKTOR), – 0,0006 г, что в 3 раза меньше. Износ колодки исследуемой пары трения, работающей на масле МС-20, в свою очередь составил 0,0052 г, что в 8,7 раза больше, чем на масле МС-20 с добавкой MANNOL (MOTOR DOKTOR), и в 26 раз больше по сравнению со смазочной композицией МС-20 с добавкой Кластер.

Известно, что каждому сочетанию металлов, режиму трения и свойств среды соответствуют определенная совокупность и характер образования вторичных структур, определяющих, в конечном итоге, формирование сил трения и величину износа. Образование вторичных структур происходит в результате одновременного протекания процессов деформации, диффузии веществ

из окружающей среды и химических реакций. Эти процессы приводят к изменению химического состава поверхностных слоев металлов, их структурного состояния. Износостойкость металла в значительной степени определяется составом и свойствами вторичных структур на поверхности трения.

Наличие вторичных структур (продуктов физико-химического взаимодействия смазочной среды с металлами

Рис. 1. Изменение момента трения за время испытания образцов на масле: Δ – МС-20; ■ – МС-20+МАННОЛ; ◊ – МС-20+Кластер

Рис. 2. Износ колодок после испытания на масле: 1 – МС-20; 2 – МС-20+МАННОЛ; 3 – МС-20+Кластер

образцов трения) обнаруживается на трущихся поверхностях деталей уже при рассмотрении невооруженным глазом или в микроскопе при небольшом увеличении.

В связи с этим для объяснения результатов трибологических испытаний пар трения на чистом масле МС-20 и с содержанием трибопрепаратов MANNOL (MOTOR DOKTOR) и Кластер проводили исследование морфологии поверхностных слоев образцов сформированных данными смазочными композициями.

На рис. 3 приведены микрофотографии поверхностей образцов, испытанных на чистом масле МС-20 и с добавками MANNOL (MOTOR DOKTOR) и Кластер.

На рис. 3 отчетливо видны отличия в рельефе поверхностей трения в зависимости от типа испытанного образца добавки к маслу, что свидетельствует о различии в химическом составе поверхностных слоев.

Рассматривая поверхность трения колодки, после испытания на чистом масле МС-20 (см. рис. 3, а), можно утверждать, что рабочие участки поверхности имеют строение без заметно видных пленок органического происхождения вторичных структур. Отсутствие защитной пленки приводит к непосредственному контакту металлических поверхностей при трении, что вызывает значительные разрушения. На поверхности трения образцов, испытанных на масле МС-20, наблюдаются дорожки трения и ярко выражены дефекты в виде коррозионных язв. Обнаружены также следы задигов и глубокие царапины.

Высокая плотность узких и коротких царапин, имеющих преимущественную направленность, вызвана, очевидно, усталостным выкрашиванием и последующим абразивным действием частиц более твердых, чем матрица материала трущихся деталей. Появление царапин на образцах трения может также быть вызвано абразивным воздействием частиц продуктов износа и твердых частиц загрязнений.

Анализ поверхности трения, представленной на рис. 3, б, сформированной под действием масла МС-20 с добавкой MANNOL (MOTOR DOKTOR), показывает, что трение модельной пары, не сопровождается грубым разрушением поверхностных слоев, как на чистом масле МС-20. В локальных местах схватывания при жестких режимах работы в основном происходит не усталостное выкрашивание вторичных структур с образованием задигов, а пластическое течение тонкого поверхностного слоя. Плотность участков схватывания на поверхностях трения незначительна.

Видно, что при испытании образцов трения на масле МС-20 с добавкой MANNOL (MOTOR DOKTOR), имеющих недостаточно высокие противоизносные свойства, на поверхности трения практически отсутствует защитная пленка. Это можно объяснить механизмом действия основного компонента добавки представляющего собой кристаллы двусернистого молибдена гексагональной формы. При попадании в зону трения дисульфид молибдена, имея пластинчатую структуру, расслаивается и переходит в нерабочее состояние. Кроме того, частицы дисульфида молибдена хаотично перемещаясь в зоне контакта трущихся деталей не всегда занимают желаемое положение что и приводит к снижению качества поверхностного слоя и частичному разрушению формирующейся пленки.

Кроме того, это можно объяснить или недостаточным количеством активных компонентов в этих добавках, или неблагоприятной структурой образующихся на трущихся поверхностях соединений, которые легко разрушаются в процессе трения и удаляются с поверхностей деталей.

При рассмотрении поверхности трения образцов, испытанных на базовом масле МС-20 с добавкой Кластер (см. рис. 3, в), в поле зрения оптического микроскопа на общем сером фоне хорошо видны участки новообразований. Суммарная площадь которых составляет 60-80 %. Характерно, что наблюдаемые участки пленки начинают формироваться в наиболее нагруженных местах поверхностей трения образцов, вызванных повышенной шероховатостью, или в зонах поверхностных дефектов. Кроме того, на поверхности трения образцов, испытанных на масле МС-20 с добавкой Кластер видны последствия интенсивного пластического течения металла, приводящего к сокрытию поверхностных дефектов и образованию сглаженного микро рельефа. Этому способствуют элементы, входящие в состав добавки, отличающиеся высокой пластичностью.

Механизм действия добавки Кластер основан, во-первых, на способности наноразмерных порошкообразных компонентов заполнять микровпадины и микродефекты трущихся поверхностей, увеличивая тем самым фактическую площадь контакта, а во-вторых, на способности компонентов добавки участвовать в процессах формирования на рабочих поверхностях деталей слоя с улучшенными трибологическими характеристиками. В результате с участием используемых частиц добавки на поверхностях трения создается модифицированный слой с высокими антифрикционными и противоизносными свойствами, предохраняющий материал детали от реализации механизмов изнашивания.

Заключение. В результате проведенных лабораторных трибологических испытаний образцов трения на чистом масле МС-20 и с содержанием трибопрепаратов MANNOL (MOTOR DOKTOR) и Кластер было установлено, что использование нанодобавки Кластер привело к снижению момента трения на 80 % по сравнению с добавкой MANNOL (MOTOR DOKTOR) и в 1,48 раза по сравнению с маслом МС-20.

Температура поверхности трения ролика в ходе испытаний масла МС-20 с нанодобавкой Кластер в конце испытаний составила 112 °С, в то время как с добавкой MANNOL (MOTOR DOKTOR) – 122 °С, а на масле МС-20 – 151 °С.

Износ колодки модельной пары трения работающей на масле МС-20 с добавкой Кластер, за время испытания, уменьшился в 3 раза по сравнению с износом на масле МС-20 с добавкой MANNOL (MOTOR DOKTOR) и в 26 раз по сравнению с базовым маслом МС-20.

Рис. 3. Поверхности трения образцов, испытанных на масле (×50): а – МС-20; б – МС-20 + MANNOL (MOTOR DOKTOR); в – МС-20 + Кластер

На рабочих участках поверхностей трения модельных образцов после их работы на масле МС-20 с добавками MANNOL (MOTOR DOKTOR) и Кластер наблюдается образование пленок различной природы и вторичных структур, которые проявляются специфическим строением рельефа.

Такое изменение поверхностей рабочих участков связано с особенностями влияния различных составов добавок в масле не только на процессы трения и износа, но и на структурные и фазовые изменения в поверхностных слоях металлов образцов трения.

Отличительной особенностью поверхностей деталей, прошедших испытания на масле МС-20 с добавкой Клас-

тер, имеющих высокие противоизносные свойства, является наличие практически сплошной пленки соединений, достаточно прочно связанной с основным материалом и выполняющей защитные функции.

Список литературы

1. Безизносная эксплуатация двигателей внутреннего сгорания / Р.Ю. Соловьев [и др.]. М., 2015. 196 с.
2. Инновационные методы повышения послеремонтной надежности сельскохозяйственной техники и инвестиционной привлекательности ремонтно-обслуживающих предприятий в АПК / В.И. Черноиванов [и др.]. М., 2012. 400 с.
3. Иванова И. В. Конструкторско-технологические методы повышения качества изделий машиностроения // Известия СПбЛТА. 2002. № 10. С. 115–121.
4. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Э.М. Берлинер [и др.]. М., 2003. 576 с.
5. Дунаев А. В., Ладиков В. В., Пустовой И. Ф., Голубев И. Г. Эффективность применения минеральных модификаторов при техническом сервисе в АПК. М., 2014. 164 с.
6. Остриков В. В., Зимин А. Г., Попов С. Ю., Сафонов В. В. Многофункциональная добавка к моторным маслам // Двигателестроение. 2014. № 2 (256). С. 32–35.
7. Остриков В. В., Зимин А. Г., Попов С. Ю. Повышение эффективности действия ремонтно – восстановительных составов. // Наука в центральной России. 2013. № 5. С. 30–35.
8. Зимин А. Г., Попов С. Ю., Остриков В. В., Сафонов В. В. Повышение эффективности и расширение функциональных свойств ремонтно-восстановительного состава // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 5. С. 42–44.
9. Ольховацкий А. К., Гительман Д. А. Применение наноматериалов для повышения эксплуатационных показателей дизелей тракторов // Вестник ЧГАУ. 2012. Т. 58. С. 143–146.
10. Черноиванов В. И., Горячев С.А. Основные подходы к ремонту и повышению уровня сервиса сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. 2012. № 12. С. 2–4.
11. Федоренко В. Ф. Нанотехнологии и наноматериалы в агропромышленном комплексе. М., 2007. 96 с.
12. Мелешко В. Ю., Карелин В. А., Павловец Г. Я., Малашин С. И., Добринский Э. К., Красюков Е. А. Способ получения ультрадисперсного порошка и устройство для его осуществления // Патент РФ № 2238174. Оpubл. 10.02.2004. Бюл. №12.
13. Пат. 2123030 Российская Федерация, МПК⁶ C10M 125/00, C10M 125:04, C10M 125:22, C10M 125:24, C10N 30:06. Смазочная композиция / Сафонов В. В., Добринский Э. К., Буйлов В. Н., Семин А. Г., Митюшкин А. А., Венскийтис В. В.; заявитель и патентообладатель – № 97116529/04; заявл. 07.10.1997; опубл. 10.12.1998, Бюл. № 34. 5 с.
14. Гороховский А. В., Палагин А. И., Сафонов В. В., Азаров А. С., Третьяченко Е. В., Сафонов К. В. Порошок титаната калия и смазочная композиция на его основе // Патент РФ № 2493104 Оpubл. 20.09.2013. Бюл. №22.
15. Добринский Э. К., Сафонов В. В., Гороховский А. В., Буйлов В. Н., Сафонов К. В., Галкин А. А. Смазочная композиция // Патент РФ № 2525238. Оpubл. 10.08.2014. Бюл. №22.

References

1. Wear-free operation of internal combustion engines / R. Yu. Soloviev, S. A. Soloviev, D. A. Gitelman et al., Ed. R.Yu. Soloviev. Moscow, 2015. 196 p.
2. Innovative methods of increasing the post-repair reliability of agricultural machinery and the investment attractiveness of repair-servicing enterprises in the agro-industrial complex: monograph / V.I. Chernov Ivanov, V.F. Fedorenko, A.K. Olkhovatsky, R.Yu. Soloviev, D.A. Gitelman; ed. V.I. Chernov Ivanov. Moscow, 2012. 400 p.
3. Ivanova I. V. Design and technological methods for improving the quality of mechanical engineering products. *Izvestia SPbLTA*. 2002; 10: 115–121.
4. Friction, wear and lubrication (tribology and tribotechnics) / E. M. Berliner et al; ed. A.V. Chichinadze. Moscow, 2003. 576 p.
5. Dunaev A. V., Ladikov V. V., Pustovoy I. F., Golubev I. G. / The effectiveness of the use of mineral modifiers in the technical service in the agro-industrial complex. Moscow, 2014. 164 p.
6. Ostrikov V. V., Zimin A. G., Popov S. Yu., Safonov V. V. Multifunctional additive to engine oils. *Drive engineering*. 2014; 2 (256): 32-35.
7. Ostrikov V.V., Zimin A. G., Popov S.Yu. Improving the efficiency of repair and recovery compounds. *Science in Central Russia*. 2013; 5: 30–35.
8. Zimin A. G., Popov S. Yu., Ostrikov V. V., Safonov V. V. Improving the efficiency and expanding the functional properties of the repair and restoration composition. *Tractors and agricultural machines*. 2014; 5: 42–44.
9. Olkhovatsky A. K., Gitelman D. A. The use of nanomaterials to improve the performance of diesel engines of tractors. *Bulletin of ChGAU*. 2012; 58: 143–146.
10. Chernov Ivanov V. I., Goryachev S. A. Basic approaches to the repair and improvement of the service level of agricultural machinery. *Rural machinery and equipment*. 2012; 12: 2–4.
11. Fedorenko V. F. Nanotechnology and nanomaterials in the agro-industrial complex. Moscow, 2007. 96 p.
12. Meleshko V. Yu., Karelin V. A., Pavlovets G. Ya., Malashin S. I., Dobrinsky E. K., Krasnyukov E. A. A method of obtaining an ultrafine powder and a device for its implementation // RF Patent No. 2238174. Publ. 02/10/2004. Bul. No. 12.
13. Pat. 2123030 Russian Federation, MPK⁶ C10M 125/00, C10M 125: 04, C10M 125: 22, C10M 125: 24, C10N 30:06. Lubricating composition / Safonov V. V., Dobrinsky E. K., Builov V. N., Semin A. G., Mityushkin A. A., Venskaitis V. V.; applicant and patentee - No. 97116529/04; declared 10/07/1997; publ. 10.12.1998, Bul. No. 34. 5 p.
14. Gorokhovskiy A. V., Palagin A. I., Safonov V. V., Azarov A. S., Tretyachenko E. V., Safonov K. V. / Powder of potassium titanate and a lubricant composition based on it // RF Patent No. 2493104 Publ. 09/20/2013. Bul. No. 22.
15. Dobrinsky E. K., Safonov V. V., Gorokhovskiy A. V., Builov V. N., Safonov K. V., Galkin A. A. Lubricating composition // RF Patent No. 2525238 Publ. 08/10/2014. Bul. No. 22.

Статья поступила в редакцию 28.11.2021; одобрена после рецензирования 12.12.2021; принята к публикации 20.12.2021.

The article was submitted 28.11.2021; approved after reviewing 12.12.2021; accepted for publication 20.12.2021.