

**О влиянии нано- и высокодисперсных порошкообразных добавок
на эксплуатационные свойства моторного масла**

**Валентин Владимирович Сафонов¹, Сергей Александрович Шишурин¹, Валерий Васильевич Остриков²,
Андрей Михайлович Захаревич³, Константин Валентинович Сафонов⁴**

¹Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Россия

²ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ», Россия, г. Тамбов, Россия

³Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

⁴ООО «Мировая техника», г. Саратов, Россия

e-mail: safonow2010sgau@yandex.ru

Аннотация. Исследования седиментационной устойчивости, показали, что у мелкодисперсных добавок, содержащих более мелкие частицы порошкообразных компонентов (30...50 нм) она в 1,32 раза выше, чем у добавок, содержащих более крупные частицы порошков (50...300 нм). Анализ результатов эксперимента показал, что модификация моторного масла Лукойл 10W–40 добавкой порошка латуни Л-60 размером частиц 30...50 нм способствовала снижению момента трения в 1,21 раза по сравнению с маслом Лукойл 10W–40, смешанным с порошком латуни Л-60 размером частиц 50...300 нм, и в 1,38 раза по сравнению с базовым маслом Лукойл 10W–40. Износ образцов (колодки) после 3 ч испытаний на базовом масле Лукойл 10W–40 в 11,6 раза больше по сравнению с износом образцов, работавших на масле Лукойл 10W–40 с добавкой порошка латуни Л-60 размером частиц 50–300 нм. Результат испытания масла Лукойл 10W–40 с добавкой порошка латуни Л-60 размером частиц 30–50 нм показал прирост массы образца трения (колодки) на 0,3 мг. Добавление в базовое масло порошка латуни Л-60 дисперсностью 30...50 нм (второй образец) через 3 ч испытаний привело к снижению температуры поверхности трения образцов на 11 и 16% по сравнению с первым образцом (Лукойл 10W–40 + латунь Л60 (50...300)) и третьим образцом (Лукойл 10W–40) соответственно.

Ключевые слова: смазочная композиция; наноразмерный порошок; высокодисперсный порошок; добавка в масло; трибологические свойства; поверхность трения; износ образцов; момент силы трения; температура поверхности трения; моторное масло; седиментационная устойчивость.

Для цитирования: Сафонов В. В., Шишурин С. А., Остриков В. В., Захаревич А. М., Сафонов К. В. О влиянии нано- и высокодисперсных порошкообразных добавок на эксплуатационные свойства моторного масла // Аграрный научный журнал. 2022. № 12. С. 100–105. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i12pp100-105>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**On the influence of nano- and highly dispersed powder additives
for performance engine oil properties**

Valentin V. Safonov¹, Sergey A. Shishurin¹, Valery V. Ostrikov², Andrey M. Zakharevich³, Konstantin V. Safonov⁴

¹Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

²Michurins State Agrarian University", Russia, Tambov, Russia

³Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russia

⁴Mirovaya Tekhnika LLC, Saratov, Russia

e-mail: safonow2010sgau@yandex.ru

Abstract. Studies of sedimentation stability have shown that for additives containing smaller particles of powder components (30...50 nm) it is 1.32 times higher than for additives containing larger particles of powders (50...300 nm). The analysis of the experimental results showed that the modification of Lukoil 10W - 40 engine oil with the addition of L-60 brass powder with a particle size of 30...50 nm contributed to a 1.21-fold reduction in friction torque compared to Lukoil 10W–40oil mixed with a particle size of 50...300 nm and 1.38 times compared to the base oil Lukoil 10W–40. The wear of samples (pads) after 3 hours of testing on base oil Lukoil 10W - 40 is 11.6 times greater compared to the wear of samples operating on Lukoil 10W–40oil with the addition of L-60 brass powder with a particle size of 50–300 nm. The test result of Lukoil 10W - 40 oil with the addition of L-60 brass powder with a particle size of 30–50 nm showed an increase in the mass of the friction sample (pads) by 0,3 mg. The addition of L-60 brass powder with a dispersion of 30...50 nm (2nd sample) to the base oil, after 3 hours of testing, led to a decrease in the temperature of the friction surface of the samples by 11 and 16% compared to the first sample (Lukoil 10W–40+ brass L60 (50 ... 300)) and to the third sample (Lukoil 10W–40), respectively.

Keywords: lubricating composition; nanosized powder; finely dispersed powder; oil additive; tribological properties; friction surface; sample wear; friction torque; friction surface temperature; motor oil; sedimentation stability.

For citation: Safonov V. V., Shishurin S. A., Ostrikov V. V., Zakharevich A. M., Safonov K. V. On the influence of nano- and highly dispersed powder additives for performance engine oil properties. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2022;(12): 100–105. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i12pp100-105>.

Введение. Эффективность производства сельскохозяйственной продукции в значительной степени определяется надежностью сельскохозяйственной техники.

Затраты на ремонт, запасные части и поддержание машинно-тракторного парка в работоспособном состоянии, в настоящий момент, составляют порядка 100 млрд руб. в год. При этом к каждому сезону ремонту подвергается 60...65 % парка тракторов и зерноуборочных комбайнов [1].





Исследование надежности агрегатов современных сельскохозяйственных машин показывает, что 35...45 % отказов приходится на двигатель. После капитального ремонта этот показатель возрастает [2, 3].

Для снижения затрат на поддержание ДВС в работоспособном состоянии необходима разработка новых прогрессивных способов повышения его долговечности. К одним из наиболее перспективных способов повышения эксплуатационной надёжности ДВС сельскохозяйственной техники относится использование современных достижений в области нанотехнологии [4–6].

Нанотехнология в настоящее время продолжает оставаться одной из наиболее важных и захватывающих областей знаний на переднем крае физики, химии и технических наук. Она дает большие надежды на интенсивное развитие новых направлений в технологичном развитии во многих сферах деятельности. Нанотехнология базируется на понимании того, что свойства частиц размером от нескольких единиц до сотен нанометров существенно отличаются от свойств исходного материала [7–10]. Эти частицы часто демонстрируют другую физику и химию процессов, происходящих с их участием, что приводит к так называемым размерным эффектам – новому поведению, зависящему от размера частиц [11, 12].

Наиболее эффективным направлением использования уникальных свойств наноматериалов является применение их в качестве средств, формирующих поверхностный слой трущихся деталей агрегатов машин [13]. В процессе работы детали машин подвергаются многообразным видам разрушений под действием физико-химических и механических процессов, происходящих в зонах контакта. Интенсивность этих процессов зависит от режимов работы сопряжений, свойств окружающей среды, применяемых конструкционных и смазочных материалов.

Одним из путей обеспечения высоких трибологических свойств поверхностных слоев контактирующих деталей является применение специальных мелкодисперсных добавок в смазочные среды [14–18].

Цель исследований – установление влияния нано и высокодисперсных порошкообразных добавок на эксплуатационные свойства моторного масла.

Методика исследований. До настоящего времени не разработана физически обоснованная классификация дисперсных материалов. По одной из классификации порошки делят на: наноразмерные – 1...30-50 нм, высокодисперсные – 30-50 ... 100-500 нм, микронные – 100–500 нм ... 10 мкм.

Современные технологии позволяют получать мелкодисперсные порошки с уникальными свойствами. Так, например, в лаборатории № 33 Государственного научно-исследовательского института химии и технологии элементоорганических соединений (ГНИИХТЭОС) освоили технологию получения мелкодисперсных порошков методом плазменной переконденсации. Порошки, полученные этим методом, имеют следующие физико-механические свойства: размер частиц 10...500 нм; высокая физико-химическая активность; значительный эффект от применения при низкой концентрации; высокая седиментационная стойкость; не задерживаются фильтрующими агрегатами.

В зависимости от типа установки и способа очистки синтезируют порошки различного размера. В одном случае получают порошок размером 30–50 нм, в другом 50–300 нм. Для определения степени влияния размера порошка на трибологические свойства моторного масла были проведены сравнительные испытания на машине трения СМЦ-2.

Приготовление смазочных композиций производили путем смешивания моторного масла Лукойл 10W–40 и порошков латуни Л-60 с размером частиц 30-50 нм (первый образец) и с размером частиц 50–300 нм (второй образец). Концентрация порошка в предлагаемой добавке составляла 3,5...4 % по массе. Для повышения седиментационной устойчивости получаемых суспензий применяли ПАВ ОП-10 в состав, которого входит смесь растворимых солей высших жирных кислот и щёлочи. Частицы этой смеси обладают обволакивающими свойствами.

Для приготовления экспериментальной порции концентрированной добавки в мерный стакан объёмом 200 мл заливали 150 мл масла Лукойл 10W–40 и добавляли определённое количество ПАВ (25 % от массы порошка) и экспериментального порошка.

Для повышения седиментационной устойчивости экспериментальных добавок перед их испытанием производили ультразвуковую обработку.

Исследование влияния размера порошка на его седиментационную устойчивость проводили следующим образом.

Необходимый для исследования объем экспериментальных добавок (1-й и 2-й образцы) заливали в разные пробирки высотой 150 мм внутренним диаметром 14,0±0,2 мм. Далее пробирки помещали в ультразвуковую ванну ОЗУ-025 (рис. 1). Включали ультразвуковую ванну и выдерживали пробирки в течение 30 мин. После чего пробирки устанавливали в штатив Ш-40 и помещали в термостат жидкостный ТЖ-ТС-01, залитый водой, подогретой до 90±1 °С.

На 1-м этапе пробирки с экспериментальными добавками, обработанными ультразвуком, выдерживали в течение 60 мин в термостате и затем его выключали на 24 ч. После чего пробирки доставали из термостата и измеряли высоту столба суспензии, осадка и чистого масла. Далее эксперимент повторяли 6 раз. Общая продолжительность эксперимента составляла 144 ч.

После чего экспериментальные добавки смешивали в определенной пропорции с базовым маслом Лукойл 10W–40 для обеспечения концентрации порошка 0,12–0,15 % по массе [14].

Полученные в результате смазочные композиции подвергали испытаниям на трение и износ модельных образцов. Трибологические свойства экспериментальных смазочных композиций сравнивали с базовым маслом Лукойл 10W–40 (третий образец). Испытания проводили на машине трения СМЦ-2.

Согласно многочисленным исследованиям, долговечность как нового, так и капитально отремонтированного двигателя зависит в основном от технического состояния сопряжения – «поршневое кольцо – гильза цилиндра». Отказы, связанные с износом данного сопряжения, являются наиболее частой причиной попадания автотракторных двигателей в капитальный ремонт [1, 3].

В связи с этим для изготовления экспериментальных образцов применяли материалы, идентичные материалам соответствующих пар трения автотракторного двигателя.



Рис. 1. Ультразвуковая ванна ОЗУ-025 с образцами экспериментальных добавок

В сопряжениях цилиндра поршневой группы основным видом трения является трение скольжение. Наиболее близко его можно воспроизвести по схеме «ролик-колодка». Ролик и колодка были изготовлены из серого чугуна СЧ-25 (ГОСТ 1412-85) одной плавки. Твердость образцов соответствовала твердости поверхности гильзы цилиндра (HB 190...220). 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 проведением трибологических испытаний выполняли тарировку испытательной машины трения СМЦ-2 по нагрузке и моменту трения. Смазка образцов пары трения происходила путём погружения вращающегося ролика на 1/3 в масляную ванну. Перед испытанием пару трения прирабатывали в течение 1,5 ч при нагрузке 1200 Н. После окончания приработки образцы тщательно промывали в техническом ацетоне ГОСТ 2768-84 и просушивали в течение 1 ч при температуре 150 °С в сушильном шкафу SNOL 67/350. Далее образцы в течение 1 ч выдерживали на открытом воздухе. Износ образцов определяли на аналитических весах HR-250AZG с точностью до 0,1 мг. Температуру поверхности трения образцов определяли с помощью цифрового пирометра Mastech MS6530. Момент трения регистрировался непрерывно при помощи пишущего устройства машины трения СМЦ-2. Продолжительность испытания составила 3 ч при нагрузке 1200 Н. По окончании испытания образцы промывали, просушивали и взвешивали по вышеизложенной методике.

Результаты исследований. Результаты исследования влияния размера порошка на седиментационную устойчивость экспериментальных добавок представлены на рис. 2, 3. Их анализ показал, что за время испытания добавки в целом сохраняют свою устойчивость.

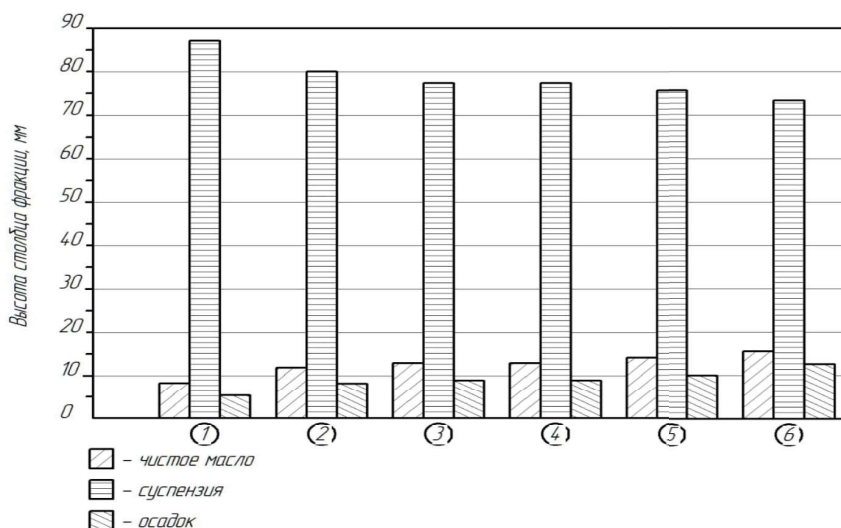


Рис. 2. Гистограмма седиментационной устойчивости добавки к моторному маслу, содержащей наноразмерный порошок латуни Л-60 с размером частиц 30...50 нм: 1 – этап испытания – 24 ч; 2 – этап испытания – 48 ч; 3 – этап испытания – 72 ч; 4 – этап испытания – 96 ч; 5 – этап испытания – 120 ч; 6 – этап испытания – 144 ч

Однако, сравнительный анализ столбцов суспензий позволяет сделать вывод, что размер частиц порошка оказывает значительное влияние на скорость их осаждения. Величина столбца суспензии добавки, содержащей наноразмерный порошок Л-60 с размером частиц 30...50 нм в 1,32 раза больше по сравнению со столбцом суспензии добавки, содержащей высокодисперсный порошок Л-60 с размером частиц 50...300 нм.

Результаты проведенных сравнительных трибологических испытаний представлены на рис. 4, 5. Обработка полученных экспериментальных данных показала, что при испытании образцов на базовом моторном масле Лукойл 10W-40 средняя величина момента силы трения после 3 ч испытания составила 5,8 Н·м (образец 3), на моторном масле Лукойл 10W-40 с

добавлением порошка латуни Л-60 размером частиц 50-300 нм – 5,1 Н·м (образец 1), в то время как на масле Лукойл 10W-40 с порошком латуни Л-60 размером частиц 30-50 нм – 4,2 Н·м (образец 2). В итоге можно отметить, что образец с более мелкой фракцией порошка (образец 2) имеет момент силы трения в 1,21 раза меньше, чем на смазочной композиции, содержащей более крупный порошок (образец 1), и в 1,38 раза меньше, чем на чистом базовом масле Лукойл 10W-40 (образец 3).

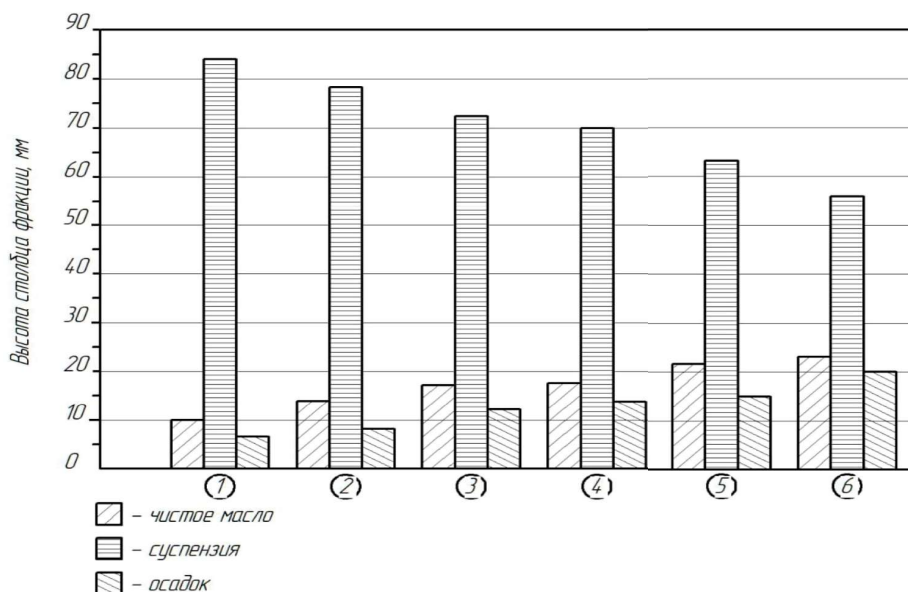


Рис. 3. Гистограмма седиментационной устойчивости добавки к моторному маслу, содержащей наноразмерный порошок латуни Л-60 с размером частиц 50...300 нм: 1 – этап испытания – 24 ч; 2 – этап испытания – 48 ч; 3 – этап испытания – 72 ч; 4 – этап испытания – 96 ч; 5 – этап испытания – 120 ч; 6 – этап испытания – 144 ч

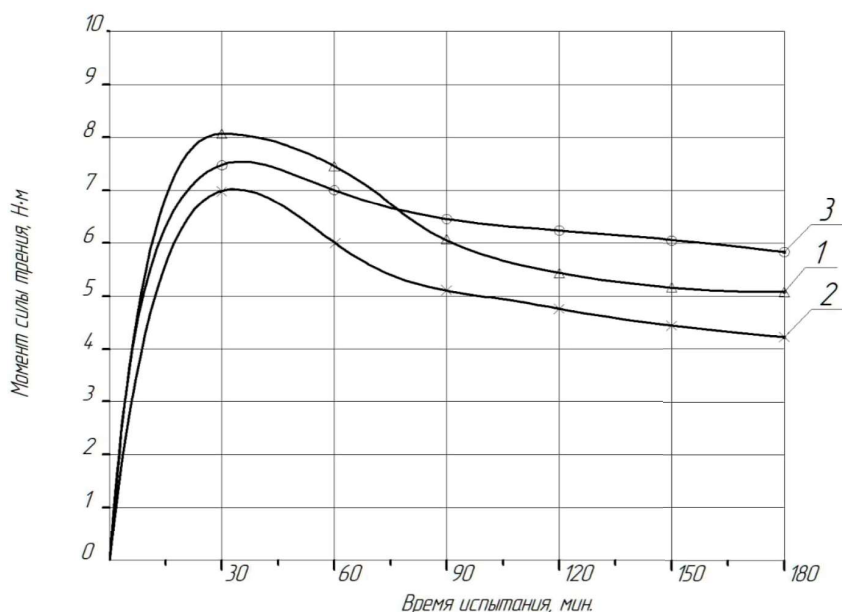


Рис. 4. Изменение момента силы трения в процессе испытания образцов на масле: 1 – Лукойл 10W-40 + латунь Л60 (50...300); 2 – Лукойл 10W-40 + латунь Л60 (30...50); 3 – Лукойл 10W-40

Величина температуры, генерируемой в зоне трения, является одним из важных показателей, характеризующих антифрикционные свойства смазочного материала. Результаты измерения температуры смазочных материалов во время испытаний представлены в таблице. Из представленных результатов видно, что исследуемые добавки приводят к снижению температуры поверхностей трения образцов, таким образом улучшая антифрикционные свойства моторного масла Лукойл 10W-40. При добавлении в базовое масло порошка латуни Л-60 дисперсностью 30...50 нм (образец 2) через 3 ч испытаний наблюдалось снижение температуры поверхности трения трущихся деталей на 11 и 16% по сравнению с первым образцом (Лукойл 10W-40 + латунь Л60 (50...300)) и третьим образцом (Лукойл 10W-40) соответственно.

Критерием оценки сравнительной противоизносной эффективности экспериментальных смазочных композиций являлась величина весового износа образцов (колодок) за время испытания. Результаты замеров износа образцов представлены в виде гистограмм на рис. 5.

Износ образцов (колодки) после 3 ч испытаний на базовом масле Лукойл 10W-40 составил 5,8 мг, на масле Лукойл 10W-40 с добавлением порошка латуни Л-60 размером частиц 50-300 нм – 0,5 мг, что в 11,6 раза меньше. Результатом испытания масла Лукойл 10W-40 с добавлением порошка латуни Л-60 размером частиц 30-50 нм явился прирост массы образца трения (колодки) на 0,3 мг.



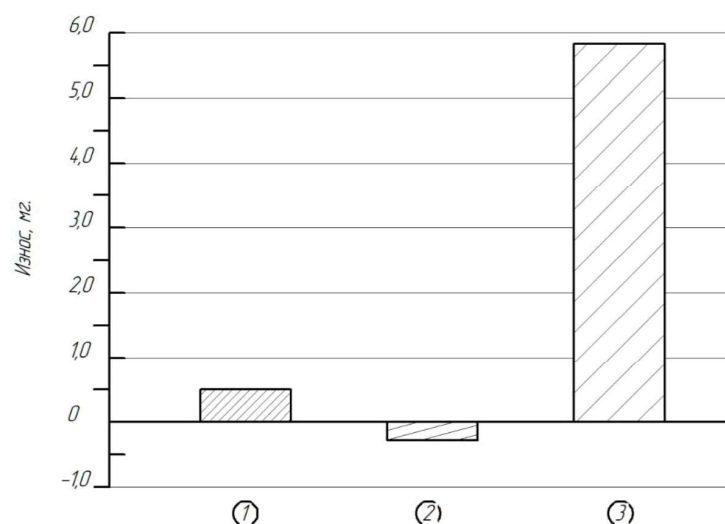


Рис. 5. Износ образцов (колодок) после испытания на масле:
1 – Лукойл 10W–40 + латунь Л60 (50...300); 2 – Лукойл 10W–40 + латунь Л60 (30...50); 3 – Лукойл 10W–40

Изменение температуры поверхности трения экспериментальных образцов на моторном масле Лукойл 10W–40 с порошкообразными добавками

Время, мин	Температура поверхности трения образцов, °С		
	Первый образец	Второй образец	Третий образец
	Лукойл 10W–40 + латунь Л-60 (50...300)	Лукойл 10W–40 + латунь Л-60 (30...50)	Лукойл 10W–40
5	58	42	65
30	150	110	148
60	152	145	157
90	164	160	178
120	168	155	176
150	165	152	174
180	164	148	172

Положительное влияние добавок nano и высокодисперсных порошков латуни Л-60 на антифрикционные и противоизносные свойства моторного масла Лукойл 10W–40 можно объяснить образованием на трущихся поверхностях тонких граничных пленок, по-видимому, состоящих из компонентов добавок.

Образование пленок, вероятнее всего, происходит в местах непосредственного контакта вершин выступов микронеровностей образцов, так как они являются активными центрами протекания диффузионных, адсорбционных и хемосорбционных процессов. Под действием указанных процессов и благодаря высокому уровню свободной поверхностной энергии nano и высокодисперсных частиц в пятнах фактического контакта создаются благоприятные условия для образования поверхностных пленок, предотвращающих непосредственный контакт трущихся тел.

Заключение. Исследования седиментационной устойчивости показали, что у добавки, содержащей более мелкие частицы порошкообразных компонентов (30...50 нм), она в 1,32 раза выше, чем у добавки, содержащей более крупные частицы порошков (50...300 нм).

Модификация моторного масла Лукойл 10W–30 добавлением порошка латуни Л-60 размером частиц 30...50 нм способствовала снижению момента трения в 1,21 раза по сравнению с добавлением порошка латуни Л-60 размером частиц 50...300 нм и 1,38 раза по сравнению с базовым маслом Лукойл 10W–30.

Износ образцов (колодки) после 3 ч испытаний на базовом масле Лукойл 10W–40 в 11,6 раза больше по сравнению с износом образцов работавших на масле Лукойл 10W–40 с добавкой порошка латуни Л-60 размером частиц 50-300 нм. Результат испытания масла Лукойл 10W–40 с добавкой порошка латуни Л-60 размером частиц 30-50 нм показал прирост массы образца трения (колодки) на 0,3 мг.

Добавление в базовое масло порошка латуни Л-60 дисперсностью 30...50 нм (второй образец) через 3 ч испытаний, привело к снижению температуры поверхности трения образцов на 11 и 16 % по сравнению с первым образцом (Лукойл 10W–40 + латунь Л-60 (50...300)) и третьим образцом (Лукойл 10W–40) соответственно.

Таким образом можно сделать вывод, что более мелкие фракции порошка повышают эксплуатационные характеристики смазочной среды и улучшают седиментационную устойчивость порошкосодержащих добавок, что в итоге должно привести к увеличению ресурса автотракторных ДВС в условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костомахин М.Н., Воронов А.Н. Сбор информации о надежности сельскохозяйственной техники в условиях эксплуатации // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. М., 2018. № 5. С. 21–26.
2. Безызносная эксплуатация двигателей внутреннего сгорания / Р. Ю. Соловьев [и др.]; под общ. ред. Р.Ю. Соловьева. М., 2015. 196 с.
3. Костомахин М. Н., Лукьянов М. Я. Анализ надежности отечественных и зарубежных тракторов на основе данных МИС // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. М., 2012. № 7. С. 34–39.





4. Наноматериалы в техническом сервисе сельскохозяйственных машин: учебное пособие для вузов / В.И. Черноиванов [и др.]; под общ. ред. В.И. Черноиванова. М., 2010. 68 с.
5. Балабанов В.И. Нанотехнологии. Наука будущего. М., 2009. 256 с.
6. Hui Chen, Guangchun Xiao, Zhaoqiang Chen, Mingdong Yi, Jingjie Zhang, Zhiliang Li, Chonghai Xu. Hexagonal boron nitride (h-BN) nanosheets as lubricant additive to 5CB liquid crystal for friction and wear reduction. *Materials Letters*. 2022. Vol. 307. P. 1–4.
7. Сафонов В.В., Шишурин С.А., Александров В.А. Повышение эффективности эксплуатации сельскохозяйственной техники за счет применения наноматериалов // *Нанотехника*. 2009. № 20. С. 79–80.
8. Сафонов В.В., Добринский Э.К. Повышение ресурса тракторных дизелей за счет металлосодержащих добавок к маслу // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2001. №4. С. 17–18.
9. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Дудко П.П. Повышение надежности трибосопряжений. СПб., 2001. 304 с.
10. Senyk S., Chodkiewicz A., Gocman K., Szczesniak B., Kaldonski T. Hexagonal Nano and Micro Boron Nitride // *Properties and Lubrication Applications, Materials*. 2022. Vol. 15. P. 955.
11. Исследования трибосоставов на основе гексагонального нитрида бора / Д.А. Гительман [и др.] // *Труды ГОСНИТИ*. 2014. Т. 115. С. 66–70.
12. Bondarev A.V., Fraile A., Polcar T., Shtansky D.V. Mechanisms of friction and wear reduction by h-BN nanosheet and spherical W nanoparticle additives to base oil // *Experimental study and molecular dynamics simulation, Tribology International*. 2020. Vol. 151. 106493.
13. Многофункциональная добавка к моторным маслам / В.В. Остриков [и др.] // *Двигателестроение*. 2014. № 2 (256). С. 32–35.
14. 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., Венскайтис В.В.; заявители и патентообладатели Сафонов В.В., Добринский Э.К., Буйлов В.Н. и [др.]. № 97116529/04; заявл. 07.10.1997; опубл. 10.12.1998, Бюл. № 34. 9 с.: ил.
15. Пат. 2493104 Российская Федерация, МПК C01G 23/00, C01D 13/00, C04B 35/462, C10M 125/10. Порошок титаната калия и смазочная композиция на его основе / Гороховский А. В., Палагин А. И., Азаров А. С., Третьяченко Е. В., Сафонов В. В., Сафонов К. В.; заявители и патентообладатели Гороховский А. В., Азаров А. С. № 2012103825/05; заявл. 03.02.2012; опубл. 20.09.2013. Бюл. № 26. 12 с.
16. Пат. 2525238. Российская Федерация, МПК C10M 125/00, C10M 125/04, B82B 3/00, C01G 23/00, C10N 30/06. Смазочная композиция / Сафонов В. В., Добринский Э. К., Гороховский А. В., Буйлов В. Н., Сафонов К. В., Галкин А. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова». № 2013116082/04; заявл. 09.04.2013; опубл. 10.08.2014. Бюл. № 22. 10 с.
17. Расширение функциональных возможностей добавок к моторным маслам / В.В. Остриков [и др.] // *Техника в сельском хозяйстве*. 2012. № 6. С. 32–33.
18. Теоретический анализ структурирования моторного масла многофункциональной добавкой / В.В. Остриков [и др.] // *Наука в Центральной России*. 2014. № 7. С. 42–52.

REFERENCES

1. Kostomakhin M.N., Voronov A.N. Collection of information on the reliability of agricultural machinery in operating conditions. *Agricultural machinery: maintenance and repair*. Moscow, 2018: 5: 21–26.
2. Wear-free operation of internal combustion engines: monograph / R.Yu. Solovyov et al.; ed. R.Yu. Solovyov. Moscow, 2015. 196 p.
3. Kostomakhin M. N. Analysis of the reliability of domestic and foreign tractors based on MIS data / M.N. Kostomakhin, M.Ya. Lukyanov // *Agricultural machinery: maintenance and repair*. – Moscow, 2012. – No. 7. – pp. 34–39.
4. Nanomaterials in the technical service of agricultural machines: textbook for universities / V.I. Chernov Ivanov et al.; ed. V.I. Chernov Ivanov. Moscow, 2010. 68 p.
5. Balabanov V.I. Nanotechnologies. Science of the future. Moscow, 2009. 256 p.
6. Hui Chen, Guangchun Xiao, Zhaoqiang Chen, Mingdong Yi, Jingjie Zhang, Zhiliang Li, Chonghai Xu. Hexagonal boron nitride (h-BN) nanosheets as lubricant additive to 5CB liquid crystal for friction and wear reduction. *Materials Letters*. 2022; 307: 1–4.
7. Safonov V.V., Shishurin S.A., Aleksandrov V.A. Improving the efficiency of operation of agricultural machinery through the use of nanomaterials. *Nanotechnics*. 2009; 20: 79–80.
8. Safonov V.V., Dobrinsky E.K. Increasing the resource of tractor diesels due to metal-containing additives to oil. *Tractors and agricultural machines*. 2001; 4: 17–18.
9. Pogodaev L.I., Kuzmin V.N., Dudko P.P. Increasing the reliability of tribo-couplings. St. Petersburg, 2001. 304 p.
10. Senyk S., Chodkiewicz A., Gocman K., Szczesniak B., Kaldonski T. Hexagonal Nano and Micro Boron Nitride. *Properties and Lubrication Applications, Materials*. 2022; 15: 955.
11. Studies of tribocompositions based on hexagonal boron nitride / D.A. Gitelman et al. *Proceedings of GOSNITI*. 2014; 115: 66–70.
12. Mechanisms of friction and wear reduction by h-BN nanosheet and spherical W nanoparticle additives to base oil / A.V. Bondarev et al. *Experimental study and molecular dynamics simulation, Tribology International*. 2020; 151: 106493.
13. Multifunctional additive to motor oils / V.V. Ostrikov et al. *Engine building*. 2014; 2 (256): 32–35.
14. Pat. 2123030 Russian Federation, IPC6 C10M 125/00, C10M 125/04, C10M 125/22, C10M 125/24, C10N 30/06. Lubricant composition [Text] / Safonov V.V., Dobrinsky E.K., Buylov V.N., Semin A.G., Mityushkin A.A., Venskaitis V.V.; applicants and patent holders Safonov V.V., Dobrinsky E.K., Buylov V.N. et al. No. 97116529/04; dec. 07.10.1997; publ. 12.10.1998, Bull. No. 34. 9 p.: ill.
15. Pat. 2493104 Russian Federation, IPC C01G 23/00, C01D 13/00, C04B 35/462, C10M 125/10. Potassium titanate powder and lubricant composition based on it / Gorokhovskiy A.V., Palagin A.I., Azarov A.S., Tretyachenko E.V., Safonov V.V., Safonov K.V.; applicants and patent holders Gorokhovskiy A.V., Azarov A.S. No. 2012103825/05; dec. 02.03.2012; publ. 09.20.2013. Bull. No. 26. 12 p.
16. Pat. 2525238 Russian Federation, IPC C10M 125/00, C10M 125/04, B82B 3/00, C01G 23/00, C10N 30/06. Lubricant composition / V.V. Safonov, E.K. Dobrinsky, A.V. Gorokhovskiy, V.N. Buylov, K.V. Safonov, A.A. Galkin; applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov». No. 2013116082/04; dec. 04.09.2013; publ. 08.10.2014. Bull. No. 22. 10 p.
17. Expanding the functionality of additives to motor oils / V.V. Ostrikov et al. *Technology in agriculture*. 2012; 6: 32–33.
18. Theoretical analysis of motor oil structuring by a multifunctional additive / V.V. Ostrikov et al. *Science in Central Russia*. 2014; 7: 42–52.

Статья поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 12.09.2022; принята к публикации 23.09.2022.
The article was submitted 22.08.2022; approved after reviewing 12.09.2022; accepted for publication 23.09.2022.