

УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПАР ТРЕНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ПРИРАБОТКИ ВАЛОВ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

С. А. Барышников, А. В. Гриценко, А. Ю. Бурцев, А. А. Шайкемелов,
Ж. С. Рахимов, О. Г. Сажаев, К. И. Лукомский

В настоящее время известно большое количество технологий по снижению трения в узлах и механизмах современных автотракторных средств. Среди них: разработка новых конструкционных материалов, совершенствование поверхностей деталей, применение новых высокоэффективных масел и присадок к ним, совершенствование режимов и условий эксплуатации и др. Среди перечисленных мероприятий выделяется направление применения присадок и наноматериалов, добавляемых в масло, которые снижают коэффициент трения и увеличивают несущую способность масел, как следствие существенно снижая износ. Микрочастицы введенных в масло присадок под действием трения сминают и деформируют поверхностные микронеровности и заполняют впадины, активируя процессы на поверхности трения. В данной работе предполагается получить существенный эффект снижения износа деталей при введении в масло эмалей и сравнении эффекта их действия с другими нанопрепаратами. Целью исследования является проведение износных испытаний масел в составе с мелкодисперсными порошками эмали разной концентрации и установление степени влияния концентрации порошка на динамику износа. За основу при испытаниях были приняты: 1. Синтетическое масло марки Mobil Super 3000 5W – 40; 2. Минеральное масло марки стандарт SAE 10W – 40 API SF/CC. За оценочные критерии эффективности применения эмалей и нанопрепаратов выбраны: износы ролика, верхнего и нижнего вкладыша, удельные износы пар трения, момент нагружения, температура. В методической части работы произведена модернизация установки СМЦ-2. При исследовании свойств мелкодисперсных порошков применяли взвеси трибопрепаратов (Micro-ceramic, Oil-Package фирмы «WAGNER») в виде жидких добавок уже готовых смесей и мелкодисперсные порошки эмали основной различного гранулометрического состава. При проведении экспериментальных исследований получена высокая эффективность использования эмалей в качестве добавки для снижения трения и увеличения несущей способности масел. Кроме того, в слое трения снижена температура в пределах 10–20 % в зависимости от концентрации эмали в масле. Эмаль выступает в качестве «третьего тела», имеющего более низкий коэффициент трения, работу разрушения и увеличивающего фактическую площадь контакта пар трения. При испытаниях присадки Oil-Package получен самый низкий коэффициент трения, который лежит в пределах 0,182–0,20. Наименьший износ ролика и вкладыша возникает при испытаниях на синтетическом масле с трибопрепаратом Oil-Package. Наименьший износ вкладыша наблюдался также при испытании синтетического масла с эмалью 150 мг/л (3-минутная).

Ключевые слова: триботехника, трение, износ, масло, присадка.

В настоящее время множество научных организаций исследуют трибологические свойства масел и смазочных систем [1, 2, 3]. Исследуются узлы автотракторных средств, совершенствуются системы [4, 5, 6]. Непрерывно совершенствуются составы присадок к маслам и улучшаются их свойства [7, 8, 9]. В то же время часть исследований направлена на разработку новых материалов [10, 11], совершенствование поверхностей трения, новых узлов и систем [12, 13], адаптацию и обосно-

вание рабочих режимов и условий эксплуатации [14, 15, 16]. Однако в практике эксплуатации и доводке систем ДВС возникают задачи увеличения трения и ускоренной приработки поверхностей [17, 18], для чего используются специально разработанные составы присадок и масел [1, 2, 4], так предприятиями на территории России производится значительная номенклатура порошков различных металлов [7, 8]. Среди них можно выделить следующие: вольфрам, кобальт, молибден, алюминий, железо

и многие другие. Известны множественные способы получения порошковых сред и их размеров [9, 10]. Размеры частиц порошка могут как уменьшать трение, так и увеличивать, в зависимости от ряда важных факторов [11].

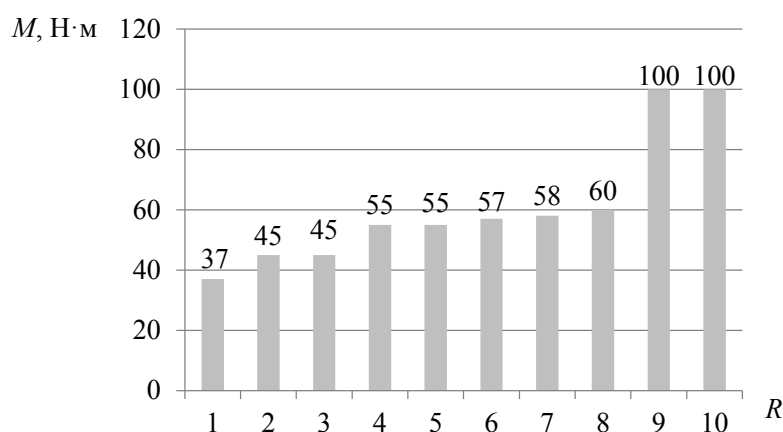
Надо сказать, что различные нанопрепараты имеют значительно различающиеся выходные параметры при их испытаниях. Так, в наших работах и работах соавторов исследовались 10 нанопрепаратов на машине трения Тимкена [5, 8, 9]. В проведенных исследованиях контролировался максимальный момент наступления задира M , Н·м при равных условиях испытания. В результате получена относительная столбиковая диаграмма контроля максимального момента наступления задира M , Н·м при равных условиях испытаний (рис. 1).

Из рисунка 1 видно, что наименьший момент наступления задира наблюдается при испытаниях чистого минерального масла. Это говорит о его низкой несущей способности и несколько больших потерях на трение при прочих равных условиях испытания в сравнении с другими марками нанопрепаратов. Наилучшие результаты показали 9 и 10 образцы фирмы «Wagner». Задир происходил при моменте, равном 100 Н·м.

Сегодня направление «наноматериалы» получило существенное развитие [10, 12]. Наноструктурные присадки используются повсеместно в машиностроении и эксплуатации

автотранспорта. Известно большое количество наноструктурных порошков, отличающихся способом получения, используемым оборудованием, режимами и условиями получения. Так, например, доказана высокая эффективность применения присадок размером менее 5 мкм, что способствует адсорбции окислов в работающем масле и последующему снижению интенсивности изнашивания деталей. Экспериментально установлен эффект уменьшения электростатической напряженности с поверхности узлов и деталей. Кроме того, дискретные частицы присадки непрерывно присутствуют в трущихся соединениях и способствуют интенсивному отводу тепла. Введенные в масло микрочастицы присадок под действием трения сминают и деформируют поверхностные микронеровности и заполняют впадины, активируя процессы на поверхности трения. С учетом происходящих процессов в зоне трения наблюдаются рост диффузии и химической активности [1, 2, 5].

В процессе эксплуатации машин происходит изнашивание деталей, сопровождающееся сложными физико-химическими явлениями и многообразием влияющих на них факторов, приводящее к неисправностям деталей [17, 18]. За неисправностями следует ремонт двигателя с заменой или восстановлением изношенных деталей. Любой ремонт – это лишние затраты (на запчасти, на работу слесарей, на электро-



1 – чистое минеральное масло для ДВС; 2 – состав Форум; 3 – состав АРВО; 4 – состав РВД;
5 – Форсан, состав универсальный; 6 – состав РВС; 7 – состав Реагент-2000;
8 – Супротек, состав универсальный; 9 – препарат Ceramic «Wagner»; 10 – препарат Oil Package «Wagner»

Рис. 1. Относительная столбиковая диаграмма контроля максимального момента наступления задира M , Н·м при равных условиях испытаний от марки нанопрепарата R



энергию и т.д.), а также неполученную прибыль из-за простоя автомобилей [19, 20]. Существует множество технологий восстановления изношенных деталей, с применением которых мы можем сэкономить часть средств, но эти технологии не освобождают нас от традиционного ремонта и затрат, с ним связанных [21, 22]. Что же касается применения нанотехнологий, то с уверенностью можно утверждать, что нанотехнологии являются ресурсосберегающими. Согласно имеющимся публикациям и актам использования указанных ремонтно-восстановительных составов, при ремонте с применением нанопрепаратов для целей восстановления, например, двигателей внутреннего сгорания различной автотракторной техники, выявлена следующая технико-экономическая эффективность их использования:

- ремонт проводится без разборки двигателя;
- ремонт производится без отрыва от производства (простои исключены);
- увеличение межремонтного периода эксплуатации в 1,5...2 раза;
- экономия за счет сокращения закупок дорогостоящих запчастей;
- экономия энергоносителей;
- сокращение потребности в помещениях, технологическом и ремонтном оборудовании, трудовых ресурсах;
- сокращение затрат на ремонт, разборочно-сборочные и регулировочные работы, потребности в помещениях, технологическом и ремонтном оборудовании, трудовых ресурсах и т.п.;
- снижение расхода топлива при работе ДВС на 5–25 %;
- увеличение срока службы смазочных материалов в 2–4 раза;
- снижение токсичности выхлопа инжекторных ДВС в 2–4 раза, дизельных ДВС в 3–5 раз;
- восстановление (улучшение) технических параметров работы ДВС до исходных (паспортных) характеристик;
- возможность использования дешевых низкосортных моторных масел;
- возможность кратковременной работы ДВС при аварийных утечках масла.

К недостаткам применяемых в настоящее время трибопрепаратов следует отнести высокую энергоемкость их получения (что делает их дорогостоящими) и до конца невыясненное влияние на состояние здоровья людей.

Материал и методы исследования

Про технологии добавления присадок и минимизацию износа трибосопряжений стало известно в 1960-е годы. С тех пор проведено огромное количество исследований, в каждом из которых авторы описывали эффект снижения трения, вплоть до полного отсутствия износа узлов и механизмов [9, 10]. Так, ими открыто явление образования поверхностной пленки на поверхности двух деталей, работающих в условиях жидкостного трения. По их исследованиям (медные сплавы при трении о стальные детали) следовало, что полученная пленка снижала силу трения в 7–15 раз, уменьшала износ в 3–5 раз. Это явление обеспечивалось на атомарном уровне. Так, в дальнейшем это привело к возникновению понятия автокомпенсации износа. На слое пленки реализовывался особый вид деформации без формирования усталостных накоплений и последующих разрушений. Далее явление образования сервовитной пленки фиксировалось при изучении порошков меди, серебра, бронзы в масле. Активное формирование пористой структуры внешнего слоя трущихся деталей способствовало образованию сервовитной пленки, которая изменяла характеристики трения. Таким образом, границы работоспособности узлов машин существенно расширялись. Предельные нагрузки, испытываемые силовые моменты увеличивались, при этом не приводя к отказным состояниям.

Производство таких материалов энергоемко и дорогостоящее, так как их производят на специальном оборудовании в малых объемах, поэтому себестоимость их достаточно высока. Поэтому была сделана попытка в качестве добавок, продлевающих ресурс двигателей, использовать другие материалы, которые работали бы по аналогии с уже существующими, но обходились бы дешевле.

При выборе порошковых материалов опирались на главное условие: материал порошка в сравнении с основным металлом детали должен иметь твердость и температуру плавления значительно ниже, чтобы в процессе трения он мог существенно терять твердость. Вплоть до вязко-жидкого состояния под действием тепла, выделяемого при трении поверхностей, заполняя впадины микронеровностей, зазоры в сопряжениях. Кроме того, позволяя существенно снижать твердость до перехода в вязко-жидкое состояние, и обладать свойствами смачивания

материалов пары трения. Среди многих материалов, отвечающих таким требованиям (например, серпентит и др. природные материалы) была выбрана эмаль основная. Основу эмали представляет легкоплавкое стекло, в практике применения по назначению их называют стеклоэмалими. Стеклоэмаль наплавляют на поверхности металлических деталей и узлов, с целью защиты от коррозии и различного рода повреждений. Применяемые эмали разбивают на две категории: покровные и грунтовые. Используемые в производстве покровные эмали имеют в своей основе оксидные соединения, фториды щелочных металлов и, кроме того, пигменты, люминофоры и др. Грунтовые эмали так же, как и покровные эмали содержат оксиды сцепления, задачей которых является образование прочного сцепления с металлом детали или узла. Центральным элементом приготовления эмали является шихта, формируемая из стекломатериала с дополнительным внесением различных добавок. Шихту нагре-

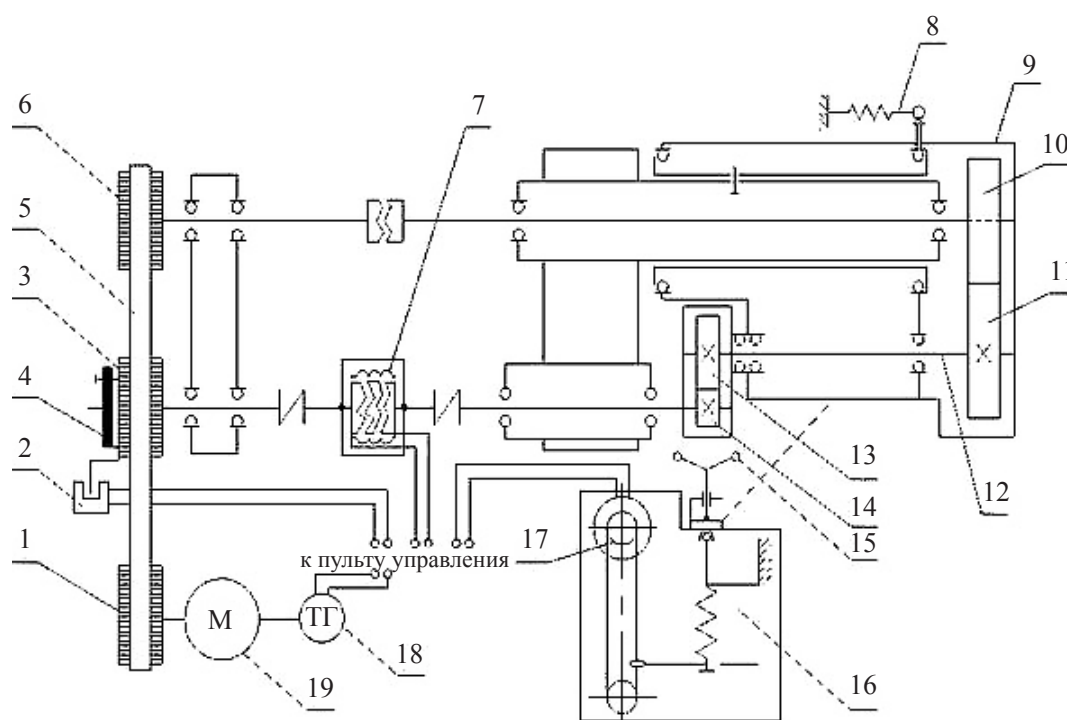
вают до температуры плавления, до образования гранул, после чего подвергают размалыванию до необходимой мелкости. В нашем случае делая предположение, что эмаль в виде порошка имеет низкую температуру размягчения, при появлении трения переходит в пластичное состояние и за счет свойств адгезии сцепляется с поверхностями трения.

Методика испытаний

Для оценки фрикционных свойств мелкодисперсных порошковых материалов использовалась машина трения СМЦ-2, снабженная дополнительным устройством для определения момента трения и с частично измененной схемой нагружения пары трения.

На рисунке 2 представлена общая схема модернизированной машины трения СМЦ-2.

Как видно из рисунка 2, основой привода машины трения СМЦ-2 является электрический двигатель привода 19, который посредством нижнего приводного шкива 1 через ремень при-



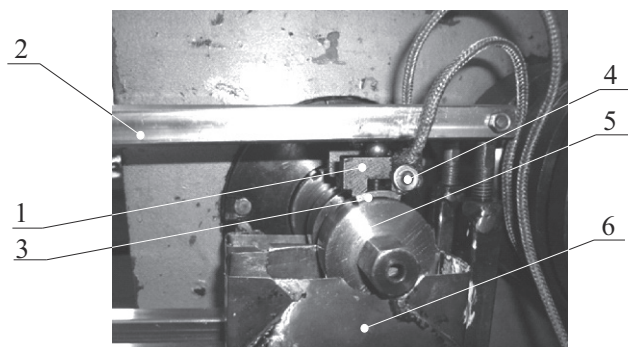
- 1 – нижний приводной шкив; 2 – датчик контроля; 3 – промежуточный шкив; 4 – устройство защиты;
5 – ремень привода; 6 – верхний шкив; 7 – датчик-измеритель момента трения; 8 – пружинный баланси́р;
9 – испытательная каретка; 10, 11 – пара шестерен испытательной каретки; 12 – валок каретки;
13, 14 – испытательные образцы; 15 – регулировочный штурвал; 16 – нагрузочное устройство;
17 – нагрузочный резистор; 18 – тахометр-генератор; 19 – электрический двигатель привода

Рис. 2. Схема модернизированной машины трения СМЦ-2

вода 5 передает вращение на промежуточный шкив 3 и верхний шкив 6. Устройство защиты 4 служит для обеспечения остановки привода машины трения в случае существенного превышения нагрузки. При помощи датчика контроля 2 осуществляется измерение пройденного пути трения. Датчик-измеритель момента трения 7 служит для контроля момента трения. Пружинный балансир 8 уравнивает конструкцию. Испытательная каретка 9 и размещенные в ней шестерни 10 и 11 обеспечивают передачу вращения. Валик каретки 12 передает вращение испытательным образцам 13 и 14. Регулировочный штурвал 15 предназначен для формирования нагружения испытательных образцов 13 и 14. На машине трения СМЦ-2 имеется нагрузочное устройство 16 с нагрузочным резистором 17 и тахометром-генератором 18 для фиксации частоты вращения.

В качестве пар трения использовались стальные ролики (материал сталь 45) диаметром 50 мм, закаленные до твердости 58HRC, а в качестве контртела использовали темплеты, полученные путем спилков вкладышей подшипников скольжения двигателя марки Д-180. Поверхности трения соприкасались на участке площадью 100 мм². Поверхность трибопары перед каждым испытанием зачищалась шлифшкуркой для создания определенной (исходной) шероховатости.

В качестве смазочного материала использовали масло синтетическое марки Mobil Super 3000 5W – 40, соответствующее требованиям ACEA A3/B3, A3/B4, AP/SM и минеральное масло марки стандарт SAE 10W – 40 API SF/CC.



1 – крепление колодок; 2 – рычаг; 3 – колодка;
4 – крепление термодатчика к колодке;
5 – вращающийся диск; 6 – ванна

Рис. 3. Узел испытания сдвоенных пар трения

Для определения свойств мелкодисперсных порошков применяли взвеси так называемых трибопрепаратов (Micro-ceramic, Oil-Package фирмы «WAGNER») в виде жидких добавок уже готовых смесей и мелкодисперсные порошки эмали основной различного гранулометрического состава.

При проведении экспериментальных исследований применялась универсальная машина трения СМЦ-2. Анализ работы машины трения СМЦ-2 показал ряд недостатков, самый главный из них – погрешность измерения. Имеющиеся недостатки можно устранить, предложив конструкцию устройства для испытания пар трения СМЦ-2 по схеме «диск – колодка». На рисунке 3 представлена сдвоенная пара трения.

На вращающийся диск 5 навешиваются две колодки 3, закрепленные на верхнем и нижнем рычаге 1, при этом колодка нижнего рычага погружена в ванну со смазкой 6. Таким образом, нижняя пара трения погружена в смазку, а верхняя пара трения смазывается маслом, выносимая диском из ванны.

На машине трения СМЦ-2 применяется регистратор усилия прижатия колодки к вращающемуся диску. При формировании нагружения на мониторе видно изменение момента трения, фазу приработки материала и ступени нагружения. Нагружение пар трения осуществляется по схеме силового замкнутого контура и, в отличие от других конструкций, не нагружает элементы привода дополнительными силами.

Во время проведения экспериментов с помощью электронных весов контролировалась сила на конце рычага устройства для измерения момента трения, также измерялась температура в зоне контакта контробразца со смазывающей средой переключением рычагов установки. Показания температуры замеряли хромель-копелевой термодатчиком, которая является наиболее применимой для измерения температуры при данных условиях процесса трения.

Испытания заканчивались, если два-три измерения момента трения были одинаковыми, считая, что процесс приработки завершен.

Методика приготовления порошкового материала

Измельчение – энергос затратный процесс. Чем более мелкая фракция, тем больше требуется энергос затрат на единицу массы порошка.

Для сохранения наиболее мелкой фракции порошка эмали необходимо использовать мокрый помол. Для небольших масштабов необходим периодический процесс.

Необходимый по размерам порошок получался технологией истирания и механического раздавливания в специальной ступе пестиком. Время воздействия устанавливалось не менее 2 часов. Исходным критерием готовности порошка являлась крупность частиц на уровне 0,2–0,4 мм. Для сохранения однородности порошка и исключения пыльности использовался изопропиловый спирт, так как он является нелетучим. Пары этой жидкости в смеси с воздухом не дают легко воспламеняемой или взрывоопасной смеси.

Для отделения фракций более крупных частиц эмали измельченная смесь заливалась спиртом, взбалтывалась, отстаивалась в течение 1,5 минут, 3 минут, 90 минут. После чего полученная жидкая фракция с мельчайшей взвесью полученного порошка сливалась. Затем производилось трехсуточное ее отстаивание, сушение до нужного кондиционного вида.

Методика измерения температуры

Температура является основным параметром при трении и изнашивании. По своим характеристикам для измерения температуры подходит термопара хромель-копелевая, второго класса, так как ожидаемая температура при измерении составляет $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, следовательно, принять термопару с диапазоном измерения от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура может выступать в качестве косвенного параметра, характеризующего работу трения, так как все виды энергии переходят в тепло: чем выше интенсивность трения, тем больше температура при рабочем режиме. Выделение теплоты происходит на границе трения контртела. Термопара крепится к верхней колодочке, так как у нее условия смазки и охлаждения хуже в сравнении с нижней колодкой, помещенной непосредственно в ванну со смазывающей средой.

Тарирование выполнялось по показаниям прибора с подключенной термопарой, когда спай термопары находился в среде с заранее известной температурой среды. Нулевую температуру создавали из смеси льда и воды, стоградусную – кипение воды. Принимали, что в указанном диапазоне температур изменение ЭДС термопары носит прямолинейный характер.

Результаты и обсуждение

Для возможности обработки результатов испытаний на машине трения СМЦ-2 необходимо рассмотреть условия испытания и установить измеряемые и контролируемые параметры. В начальной, подготовительной части испытаний принимаем:

1. Синтетическое масло марки Mobil Super 3000 5W – 40, которое соответствует требованиям ACEA A3/B3, A3/B4, AP/SM;

2. Минеральное масло марки стандарт SAE 10W – 40 API SF/CC;

3. Нагрузка на пару трения – 45 Н.

4. Кроме того, через контрольное время t необходимо измерить силу P на конце рычага устройства и температуру t , $^{\circ}\text{C}$ в зоне контакта контробразца со смазывающей средой.

В следующей части исследований необходимо подготовить пары трения. Перед испытаниями производится взвешивание ролика и вкладышей:

1. Масса ролика m_p ;

2. Масса верхнего вкладыша m_b ;

3. Масса нижнего вкладыша m_n .

После проведения испытаний производится взвешивание пары трения:

1) масса ролика m'_p ;

2) масса верхнего вкладыша m'_b ;

3) масса нижнего вкладыша m'_n .

После всех проведенных измерений определяется абсолютный износ:

– ролика:

$$\Delta m_p = m_p - m'_p, \quad (1)$$

– износ верхнего вкладыша:

$$\Delta m_b = m_b - m'_b, \quad (2)$$

– износ нижнего вкладыша:

$$\Delta m_n = m_n - m'_n, \quad (3)$$

Определим суммарный удельный износ верхнего и нижнего вкладышей за 1 час работы пары трения:

$$U_{\text{уд.}(b+n)} = \frac{60 \cdot (\Delta m_b + \Delta m_n)}{t}, \quad (4)$$

где t – время испытания, минут.



Удельный износ ролика за 1 час работы пары трения определяется уравнением:

$$U_{\text{уд.р}} = \frac{60 \cdot \Delta m_p}{t}, \quad (5)$$

где t – время испытания, минут.

В завершающей части расчетов определим суммарный удельный износ:

$$U_{\text{уд.сум}} = U_{\text{уд.(в+н)}} + U_{\text{уд.р}}. \quad (6)$$

Перед основным этапом исследования необходимо было установить величину силы нагружения пар трения. Критерием выбора нагрузки служила температура пары трения: температура пары трения при работе на чистом масле не должна превышать значений 80...90 °С, установленных для большинства

современных инжекторных и дизельных двигателей. Такая температура (установившаяся) была зафиксирована при нагружении колодки трения силой 45 Н. Все опыты проводились при указанной нагрузке пар трения и при одинаковой частоте вращения ролика (шпинделя машины трения СМЦ).

На рисунке 4 представлена экспериментальная зависимость момента трения масла $M_{\text{тр}}$, Н·м от времени испытания t , мин.

Из рисунка 4 видно, что на начальном этапе нагружения (0–150 мин) момент трения пары с эмалью (0,375%) гораздо выше, чем на масле без добавок. Превышение составляет в среднем 25 Н·м. Далее с увеличением времени испытания разность моментов сохраняется, но уже несколько меньшая – 11–12 Н·м.

На рисунке 5 представлена экспериментальная зависимость температуры пары трения масла T , °С от времени испытания t , мин.

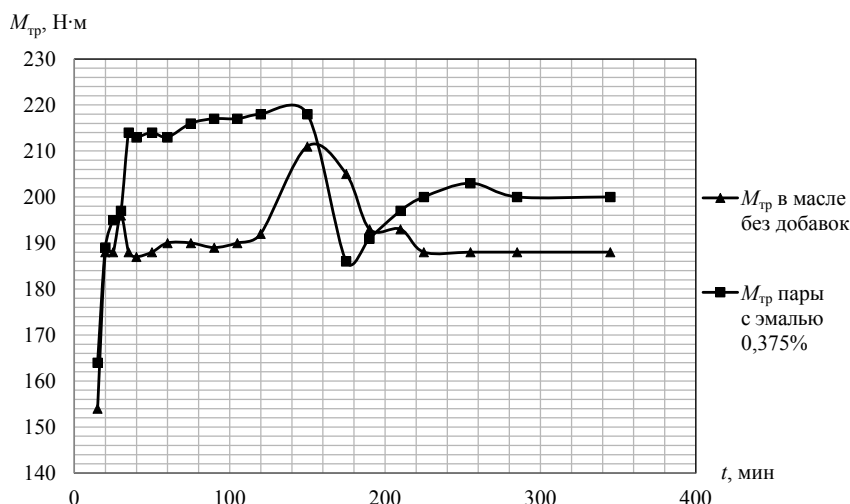


Рис. 4. Экспериментальная зависимость момента трения масла $M_{\text{тр}}$, Н·м от времени испытания t , мин

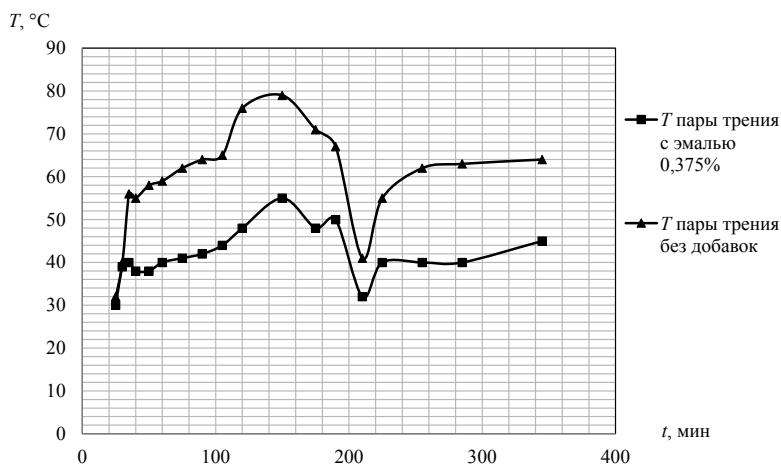


Рис. 5. Экспериментальная зависимость температуры пары трения масла T , °С от времени испытания t , мин

Анализ данных на рисунке 5 показывает, что добавление эмали (концентрация 0,375%) приводит к уменьшению температуры пары трения. Это уменьшение составляет в среднем 20 °С.

На рисунке 6 представлена экспериментальная зависимость момента трения масла $M_{тр}$, Н·м от времени испытания t , мин.

Из рисунка 6 видно, что момент трения снижается с ростом концентрации эмали до 0,375%.

На рисунке 7 представлена экспериментальная зависимость температуры пары трения масла T , °С от времени испытания t , мин.

Как видно из рисунка 7, температура пары трения снижается с повышением концентрации эмали до 0,375%. Эта разница в среднем составляет 10 °С.

В дальнейшей экспериментальной работе проводилась сравнительная оценка коэффициентов трения при работе пар трения в условиях

с различной концентрацией добавок в синтетическое и минеральное масла. Так, в результате расчета по экспериментальным данным была получена зависимость коэффициента трения от времени испытания при работе пары трения на синтетическом масле (рис. 8).

Данные рисунка 8 свидетельствуют о том, что добавка эмали в синтетическое масло приводит к повышению коэффициента трения. Так, например, более крупная фракция порошка (3-минутная) и большая ее концентрация ведет к повышению трения в сравнении с более мелкой (90-минутная) и меньшей концентрацией.

Так, в результате расчета по экспериментальным данным была получена зависимость коэффициента трения от времени испытания при работе пары трения на синтетическом масле (рис. 9).

Как видно из рисунка 9, коэффициент трения при использовании минерального масла

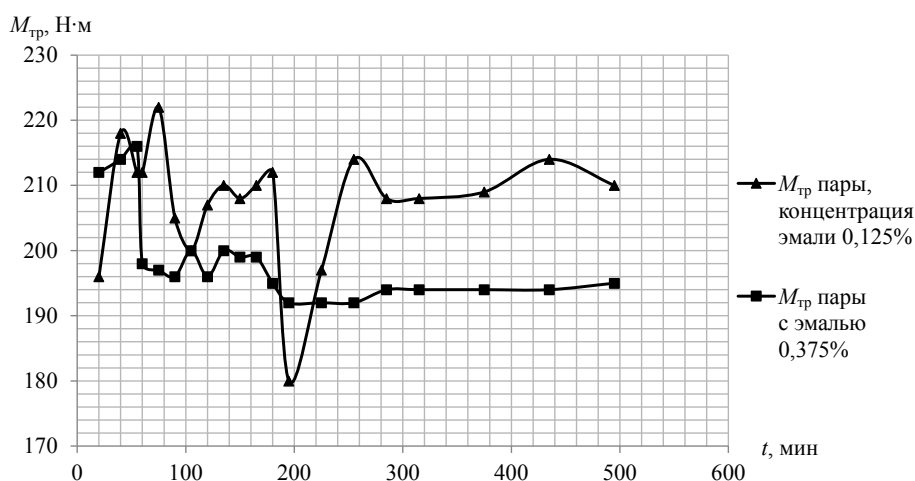


Рис. 6. Экспериментальная зависимость момента трения масла $M_{тр}$, Н·м от времени испытания t , мин

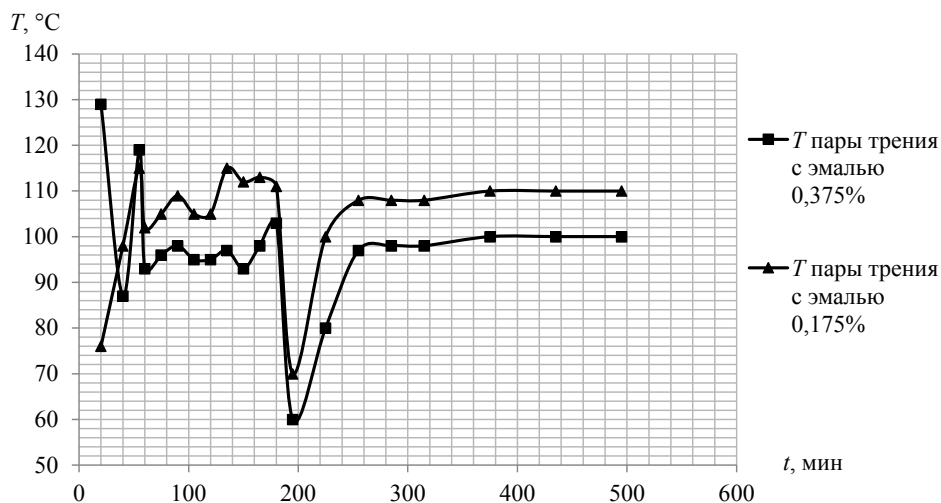


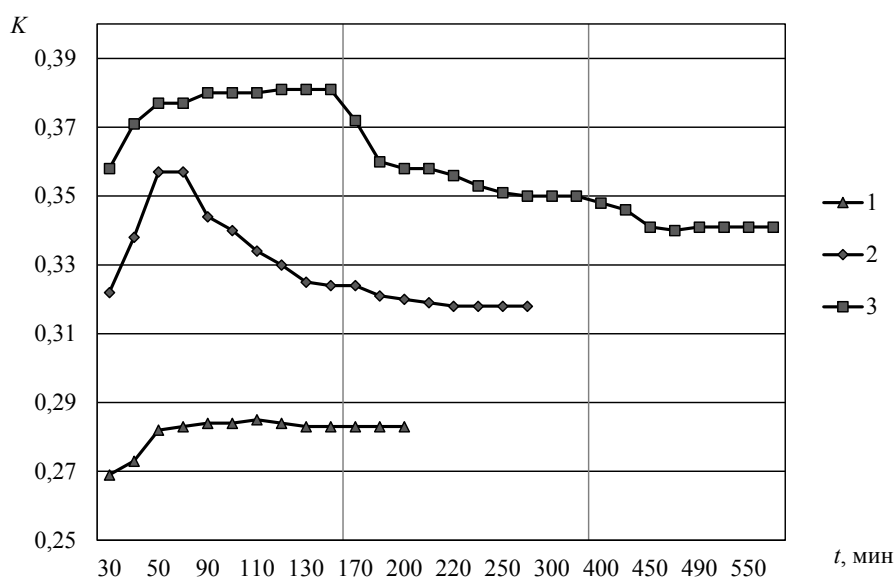
Рис. 7. Экспериментальная зависимость температуры пары трения масла T , °С от времени испытания t , мин

существенно выше (больше), чем при применении синтетического масла (см рис. 8 и 9). Т.е. несущая способность синтетического масла выше минерального. Но при добавке в минеральное масло мелкой фракции (90-минутная) порошковой эмали коэффициент трения уменьшается в конце этапа приработки. Можно предположить, что эмаль в такой ситуации может выступать в качестве «третьего тела», имеющего более низкий коэффициент трения, работу раз-

рушения и увеличивающего фактическую площадь контакта пар трения.

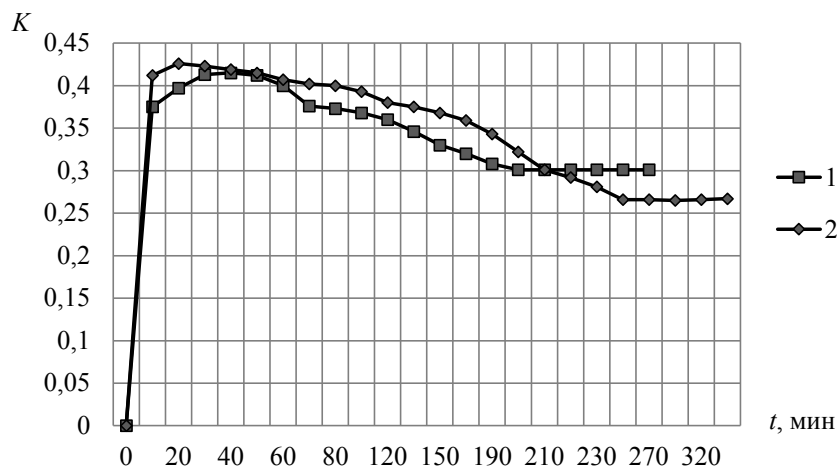
При работе пар трения на синтетическом масле с добавлением нанопорошков (рис. 10) закономерность изменения коэффициента трения аналогична изменению показателя (K) на минеральном масле (см. рис. 9).

Как видно из рисунка 10, самый высокий коэффициент трения наблюдается при испытании micro-ceramik в диапазоне от 40 до



1 – чистое синтетическое масло; 2 – синтетическое масло с добавкой эмали 25 мг/л (90-минутная);
3 – синтетическое масло с добавкой эмали 150 мг/л (3-минутная)

Рис. 8. Зависимость коэффициента трения K от времени испытания t , мин при работе пары трения на синтетическом масле



1 – чистое минеральное масло; 2 – минеральное масло с добавлением эмали 25 мг/л

Рис. 9. Зависимость коэффициента трения K от времени испытания t , мин при работе пары трения на минеральном масле

150 мин. После коэффициент трения снижается и держится на уровне 0,234. В то время как на чистом синтетическом масле коэффициент трения в начале испытаний достигает значения 0,263. Затем повышается до 0,287 и в конце приработки снижается и стабилизируется на уровне 0,281. При испытаниях присадки Oil-Package коэффициент трения лежит в пределах 0,182–0,20.

Сравнивая данные, полученные при испытаниях чистых масел и масел с добавлением мелкодисперсных порошковых материалов, было выявлено, что данные добавки могут как

понижать, так и повышать коэффициент трения пар в зависимости от гранулометрического состава порошка и его концентрации в масле. Но в пределах принятой длительности испытания абсолютные значения коэффициента трения с добавкой нанопорошков существенно ниже, чем с добавками порошковой эмали. Возможно, это зависит от среднестатистического размера порошка эмали.

Исследуя удельный износ вкладышей (в сумме) и ролика за 1 час работы на синтетическом масле (рис. 11), можно сказать, что чем

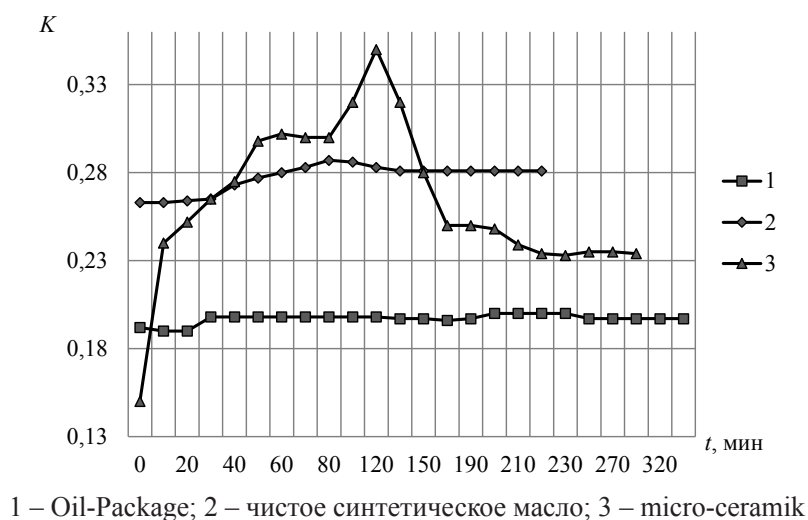
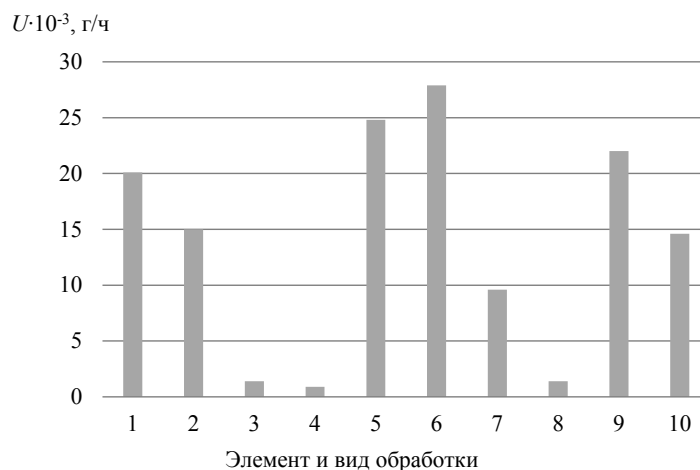


Рис. 10. Взаимосвязь коэффициента трения K от времени испытания t , мин при работе пары трения на синтетическом масле с добавлением нанопорошков



1 – износ ролика при трении в масле с эмалью 25 мг/л (90-минутная); 3 – то же с трибопрепаратом Oil-Package; 5 – то же с трибопрепаратом micro-ceramik; 7 – то же с эмалью 150 мг/л (3-минутная); 9 – то же на чистом масле; 2 – износ вкладышей при трении в масле с эмалью 25 мг/л (90-минутная); 4 – то же с трибопрепаратом Oil-Package; 6 – то же с трибопрепаратом micro-ceramik; 8 – то же с эмалью 150 мг/л (3-минутная); 10 – то же на чистом масле

Рис. 11. Удельный износ пар трения $U \cdot 10^{-3}$, г/ч на синтетическом масле



крупнее по своему гранулометрическому составу мелкодисперсный порошок, тем больше износ пары трения.

Как видно из рисунка 11, наименьший износ ролика и вкладыша возникает при испытаниях на синтетическом масле с трибопрепаратом Oil-Package. Наименьший износ вкладыша наблюдался также при испытании синтетического масла с эмалью 150 мг/л (3-минутная).

Данные рисунка 12 свидетельствуют о том, что удельный износ пары трения при добавке эмали оказался ниже, чем на чистом масле.

Причем разница в износе ролика между 1 и 3 вариантами составляет $10,7 - 2,1 = 8,6 \cdot 10^{-3}$ г/ч. Разница в износе вкладыша между 2 и 4 вариантами $28,4 - 2,69 = 25,71 \cdot 10^{-3}$ г/ч.

Можно утверждать, что при данных условиях испытаний удельная нагрузка пары при реализации трения на чистом масле превысила несущую способность масла (переход в режим полусухого трения), а добавка эмали создала возможность образования пары трения сталь – эмаль, эмаль таким образом, являясь «третьим телом», изменила и момент трения, и износ пары.

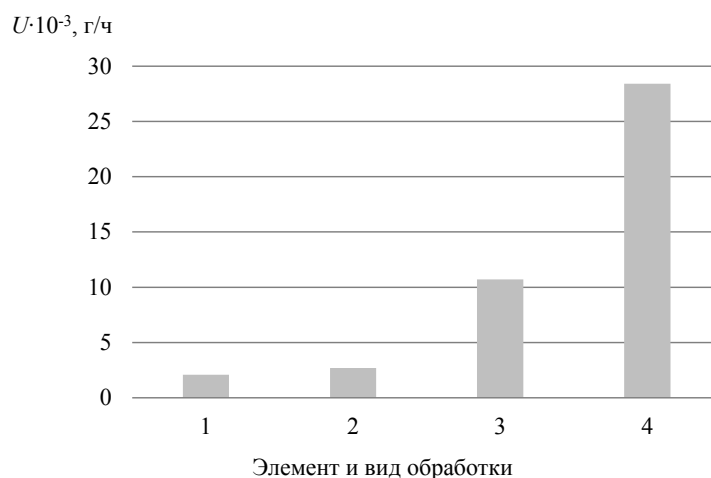
Выводы

Трение и изнашивание являются объективными процессами, в результате которых изменяются служебные свойства сопряжений и деталей; машина в целом становится непригодной для дальнейшего использования. Ресурс машины можно продлить за счет улучшения ус-

ловий работы сопряжений и применением трибопрепаратов (порошковых материалов).

Предварительно установлено, что наилучшей несущей способностью обладают масла в комбинации с препаратами «Wagner», наилучшими – чистые минеральные масла без присадок. Доказана эффективность применения нанопрепаратов с размером частиц менее 5 мкм. Основой их эффективности является рост межремонтного периода эксплуатации в 1,5...2 раза, снижения токсичности в 2...5 раз в зависимости от типа ДВС, уменьшение расхода топливно-смазочных материалов в 2...4 раза.

Разработана методика проведения экспериментов, выбрано необходимое оборудование, приспособления, материалы. Изготовлен порошковый материал размером 0,2–0,4 мм при условии отстаивания: в течение 1,5 минут, 3 минут, 90 минут. Проведены опыты по определению сравнительных характеристик величин износа и коэффициента трения подвижных соединений с обычной смазкой и с применением нанопрепаратов. Установлено увеличение момента трения со 190 до 220 Н·м при использовании добавки эмали 0,375% и снижение температуры в среднем на 20 °С по сравнению с маслом без добавки. Обнаружено снижение момента трения масла с ростом концентрации эмали в среднем на 20 Н·м (рост с 0,125 до 0,375%) и уменьшение температуры на 10...13 °С. Установлено увеличение коэффициента трения на 0,08...0,09 при введении добавки эмали в синтетическое масло



1 – износ ролика при работе в масле с добавкой эмали 25 мг/л (90-минутная); 2 – износ вкладыша в тех же условиях; 3 – износ ролика (чистое масло); 4 – износ вкладыша (чистое масло)

Рис. 12. Удельный износ пар трения

концентрацией 150 мг/л. Существенного снижения коэффициента трения достигли при использовании состава Oil-Package с синтетическим маслом – в среднем на 0,08. Соответственно, наименьший износ ролика и вкладыша также получен при использовании препарата Oil-Package.

Сделано заключение о возможности применения порошковых материалов при техническом сервисе. Разработана методика получения мелкодисперсных порошков эмали, предложена конструкция устройства, повышающая точность измерения момента трения. Проведенные лабораторные испытания подтвердили возможность применения мелкодисперсных порошков эмали в качестве добавки к минеральному маслу с целью снижения момента трения в подшипниках скольжения. Можно рекомендовать проведение дополнительных исследований для уточнения концентрации и гранулометрического состава порошков эмали, уточнения состава эмали. Результаты данных исследований позволят использовать мелкодисперсные порошки на основе эмали вместо рекомендуемых теперь дорогостоящих наноматериалов.

Список литературы

1. Levanov, I. Influence of Friction Geo-modifiers on HTHS Viscosity of Motor Oils / I. Levanov, E. Zadorozhnaya, D. Vichnyakov // *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering*. – 2019. – P. 967–972. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_101.
2. Zadorozhnaya, E. A. Solving a thermohydrodynamic lubrication problem for complex-loaded sliding bearings with allowance for rheological behavior of lubricating fluid / E. A. Zadorozhnaya // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2015. – Vol. 44. – № 1. – P. 46–56.
3. Fedorov, S. V. Nano-Structural Standard of Friction and Wear / S. V. Fedorov // *Tribology in Industry*. – 2018. – Vol. 40. – Is. 2. – P. 225–238. – DOI: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.02.06>.
4. A study the axial and radial rotor stability of the turbo machinery with allowance the geometry of the surface and properties of the lubricating fluid / E. A. Zadorozhnaya, S. V. Cherneyko, M. I. Kurochkin, N. A. Lukovich // *Tribology in Industry*. – 2015. – Vol. 37 (4). – P. 445–463.
5. Эксплуатационные испытания двигателей ЗМЗ-4062 при добавлении в моторное масло нанопрепарата фирмы Wagner Universal – Micro-CeramicOil / Р. Ю. Соловьев, А. К. Ольховацкий, А. В. Гриценко [и др.] // *Труды ГОСНИТИ*. – 2013. – Т. 112. – Ч. 1. – С. 119–128.
6. Tribological studies of high velocity oxy-fuel (HVOF) superalloy coatings / M. Kandeve, E. Zadorozhnaya, Z. Kalitchin, P. Svoboda // *Journal of the Balkan Tribological Association*. – 2018. – Vol. 24 (3). – P. 411–428.
7. Мазалов, Ю. А. О продлении ресурса дизелей тракторов и экономии топлива применением наноматериалов / Ю. А. Мазалов, А. К. Ольховацкий, Р. Ю. Соловьев // *Труды ГОСНИТИ*. – 2010. – Т. 105. – С. 111–115.
8. Лялякин, В. П. Применение ремонтно-восстановительных наноматериалов в техническом сервисе / В. П. Лялякин, А. К. Ольховацкий // *Труды ГОСНИТИ*. – 2007. – Т. 100. – С. 140–143.
9. Наноматериалы для продления послеремонтного ресурса тракторных трансмиссий и экономии топлива / В. П. Лялякин, А. К. Ольховацкий, Д. А. Гительман, А. П. Шавкунов // *Технология металлов*. – 2011. – № 1. – С. 25–27.
10. Сафонов, В. В. Нанодисперсионные металлосодержащие добавки к моторным маслам / В. В. Сафонов, Э. К. Добринский // *МТС*. – 2004. – № 1. – С. 42–44.
11. Лялякин, В. П. Наноматериалы влияют на зазоры в ресурсных сопряжениях деталей / В. П. Лялякин, А. К. Ольховацкий // *Машинно-тракторная станция*. – 2008. – № 4. – С. 46–49.
12. Гайдар, С. М. Исследование эффективности триботехнических препаратов на основе наноматериалов / С. М. Гайдар, М. Ю. Карелина // *Грузовик*. – 2015. – № 4. – С. 17–29.
13. Адигамов, Н. Р. Лабораторно-эксплуатационные испытания установки безразборного диагностирования оборудования животноводческих ферм / Н. Р. Адигамов, И. Х. Гималтдинов // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2011. – Т. 6. – № 2 (20). – С. 89–90.
14. Адигамов, Н. Р. Теория и практика определения остаточного ресурса подшипниковых узлов дробилок кормов / Н. Р. Адигамов, И. Х. Гималтдинов // *Техника и оборудование для села*. – 2015. – № 10. – С. 44–48.
15. Гималтдинов, И. Х. Решение инженерной задачи при разработке прибора для вычисления остаточного ресурса подшипников качения / И. Х. Гималтдинов, Р. С. Шайхетдинова // *Вестник Технологического университета*. – 2016. – Т. 19. – № 7. – С. 112–116.
16. Задорожная, Е. А. Результаты расчета динамики ротора турбокомпрессора ТКР-8,5С



/ Е. А. Задорожная, Н. А. Хозенюк, П. А. Тараненко // Вестник ЮУрГУ. – Сер. : Машиностроение. – 2006. – № 11 (66). – С. 69–77.

17. Gritsenko, A. V. Development of combined ICE startup system by means of hydraulic starter / A. V. Gritsenko, A. M. Plaksin, Z. V. Almetova // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1238–1245.

18. Gritsenko, A. Studuing Lubrication System of Turbocompressor Rotor with Integrated Electronic Control / A. Gritsenko, A. Plaksin, V. Shepelev // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017 Procedia Engineering 206. – 2017. – P. 611–616.

19. Машрабов, Н. Обоснование метода определения температурного поля при на-

плавке, термической и механической обработке / Н. Машрабов, А. В. Геренштейн, Е. А. Геренштейн // АПК России. – 2015. – Т. 73. – С. 69–75.

20. Методика определения размеров активного пятна дуги / Н. Машрабов, Е. В. Шаманова, Е. А. Осенних, А. С. Меньшенин // АПК России. – 2020. – Т. 27. – № 3. – С. 486–491.

21. Mashrabov, N. Plasma hardening of elements for soil cultivating instruments / N. Mashrabov, V. V. Erofeev, V. A. Korotkov // Welding International. – 2020. – Vol. 34. – № 4–6. – P. 152–156. – DOI: 10.1080/09507116.2021.1921386.

22. Машрабов, Н. Плазменная закалка элементов почвообрабатывающих орудий / Н. Машрабов, В. В. Ерофеев, В. А. Коротков // Сварочное производство. – 2018. – № 12. – С. 24–29.

Барышников Сергей Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности», ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет.

E-mail: 2serg_b@mail.ru.

Гриценко Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»; профессор кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности», ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет.

E-mail: alexgrits13@mail.ru.

Бурцев Александр Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры специальных дисциплин, филиал Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева, г. Белово.

E-mail: burzeval2009@yandex.ru.

Шайкемелов Адиль Амандыкович, аспирант кафедры «Автомобильный транспорт», ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)».

E-mail: adil_shaikemelov@mail.ru.

Рахимов Жанат Сагындыкович, аспирант кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка, и технология и механизация животноводства», ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет.

E-mail: rahimov-96@mail.ru.

Сажаяев Олег Геннадьевич, аспирант кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности», ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет.

E-mail: o.sazhaev1998@mail.ru.

Лукомский Константин Иванович, канд. техн. наук, доцент 4-й кафедры общетехнических дисциплин, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, филиал в г. Челябинске.

E-mail: klukomsky@mail.ru.

* * *