

# Оценка противоизносных свойств трансмиссионного масла с наноразмерными порошкообразными добавками

В. В. Сафонов, В. В. Венскийтис, А. С. Азаров

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»,  
Театральная пл., 1, г. Саратов, 410012, Россия, e-mail: [nirmsgau@mail.ru](mailto:nirmsgau@mail.ru)

Проведены комплексные экспериментальные исследования влияния одно- и двухкомпонентных наноразмерных порошкообразных добавок на эксплуатационные свойства трансмиссионного масла ТМ-3-18 (ТАП-15В ГОСТ 23652-79). Установлено, что введение наноразмерных порошкообразных добавок оловянной бронзы и оксида алюминия в базовое масло повышает его антифрикционные, противоизносные, противозадирные свойства и способствует увеличению долговечности зубчатых колес, лимитирующих ресурс агрегатов трансмиссии трактора.

*Ключевые слова:* надежность, межремонтный ресурс, трансмиссионное масло, смазочная композиция, износ, наноразмерные порошки, трибологические свойства, поверхность трения, контактная выносливость.

УДК 621.89.09

## ВЫБОР СПОСОБА СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСМИССИИ

Проблема надежности сельскохозяйственной техники в последние годы вновь обострилась в связи с дальнейшим ухудшением состояния материально-технической базы АПК. Опережение темпов списания техники над ее поступлением, старение парка машин и несовершенство ремонтно-обслуживающей базы привели к снижению эффективности функционирования сельскохозяйственных организаций (СХО) [1]. Выработали свой ресурс и находятся за пределами нормативных сроков амортизации 33% эксплуатируемых тракторов, 75% зерноуборочных и кормоуборочных комбайнов [2]. По оценкам экспертов, потери от недостаточной оснащенности СХО тракторами и эксплуатации их сверх срока амортизации составляют 0,9 млрд. и 23 млрд. руб. соответственно [3]. Дефицит технологически исправного количества тракторов вызывает увеличение нагрузки на имеющиеся в СХО машины и, как следствие, – рост частоты их неисправностей. В сложившихся условиях 15–20% парка машин неработоспособны и простаивают в ремонте [4]. Ежегодные затраты на восстановление сельскохозяйственной техники, по разным оценкам, составляют от 20 до 65 млрд. руб (12–15% себестоимости сельскохозяйственной продукции) [1].

У гусеничных тракторов 3 тягового класса (ДТ-175С) наибольшее количество отказов в агрегатах трансмиссии возникает в интервале наработки 1000–2000 моточасов, при этом более 84% относятся к III группе сложности и требуют проведения текущих ремонтов. В 55% случаев отказы вызваны износом деталей [5]. Ресурс

силовых передач тракторов лимитируют в основном зубчатые колеса. Согласно литературным данным [6], наибольшее влияние на ресурс тяжело нагруженных, обильно смазываемых зубчатых колес оказывает усталостное изнашивание (питтинг), зависящее от шероховатости поверхностей, величины силы трения в контакте, вида смазки, эксплуатационных свойств смазочного материала и других факторов. Традиционные для машиностроения конструкторско-технологические мероприятия в значительной степени исчерпали свои принципиальные возможности и не обеспечивают доремонтного и межремонтного ресурсов составных частей. Учитывая быстрое старение тракторного парка, ухудшение финансово-экономического состояния производителей сельскохозяйственной продукции, а также доступность трибологических методов, в данной работе предлагается повысить долговечность зубчатых передач за счет улучшения смазочных свойств трансмиссионного масла.

Повышение смазочных свойств стандартных трансмиссионных масел достигается введением в их состав противоизносных и противозадирных маслорастворимых присадок. В качестве таких присадок используются серо-, фосфор- и хлорсодержащие органические соединения. Однако они имеют ряд существенных недостатков – повышенную коррозионную агрессивность отдельных присадок к сталям, снижение контактной выносливости материала зубчатых колес, высокую токсичность и т.д. В последнее время широкое распространение получают добавки на основе наноразмерных порошков (НРП), которые не имеют указанных недостатков [7, 8, 9]. Во Франции производят противозадирную добавку Sorreg, содержащую частицы рафинированной

меди и свинца, а также препарат Metal-5, содержащий частицы сплава меди, цинка и серебра дисперсностью 1–5 мкм. В Венгрии применяется металлоплакирующий препарат Eska, имеющий твердофазную добавку. В США разработаны препараты Restorer, Repower на основе порошков медных сплавов. Импортные препараты Remetalisant Moteur, Lubrifilm плакируют пленками мягких металлов поверхности стальных деталей. В Германии производятся препараты Nanoprof Motor Refit KFZ, Nano Vit Motor Renovator, в которых присутствуют порошки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , С.

Антифрикционная присадка в масло Liqui Moly CeraTec, созданная компанией Liqui Moly GmbH, содержит синтетический молибдено-органический комплекс и частицы микрокерамики. Как заявляет производитель, в присадке Liqui Moly Cera Tec присутствуют микроэлементы: кальций Са – 1598 мг/кг, магний Mg – 4 мг/кг, бор В – 359 мг/кг, цинк Zn – 776 мг/кг, фосфор Р – 656 мг/кг и молибден Мо – 5419 мг/кг. Состав микроэлементов указывает на то, что компания Liqui Moly в данном продукте использует как молибдено-органический комплекс вместе с классическими антизадирными присадками на основе ZDDP, так и микрокерамику на основе нитрида бора. Диаметр частиц мелкодисперсного порошка дисульфида молибдена составляет 1,3–1,9 мкм, что позволяет не осаждаться на гидрокомпенсаторах и в масляном фильтре, так как размеры порошка значительно меньше, чем диаметр пор фильтрующего элемента (до 40 мкм).

Французская присадка Bardahl Turbo Protect обеспечивает высокие результаты благодаря двум технологиям: Polar Plus и Fullerene C60. Технология Polar Plus заключается в формировании слабых ионных связей между молекулами присадки и поверхностью металла. Технология Fullerene C60, применяемая совместно с Polar Plus, предполагает использование в составе фуллереновых сфер, которые, по замыслу разработчиков, ведут себя как микроподшипники: находясь между трущимися металлическими поверхностями двигателя, они создают буферную зону, тем самым уменьшая трение, защищая детали от износа и коррозии. В присадке Bardahl Turbo Protect присутствуют микроэлементы: кальций Са – 3491 мг/кг, магний Mg – 10 мг/кг, бор В – 137 мг/кг, цинк Zn – 5583 мг/кг и фосфор Р – 7595 мг/кг. Состав микроэлементов указывает на то, что в Bardahl Turbo Protect присутствуют пакет моющих присадок (большое количество кальция) и мощный противозадирный пакет, о чем говорит сочетание фосфора и цинка.

Немецкая добавка Wagner Universal Micro-Ceramic Oil (Eni S.p.A. Refining and Marketing) относится к нанопродуктам, она применяется в

двигателях и механических коробках передач (КП). Эта добавка содержит мельчайшие керамические частицы.

Атомарный кондиционер металла Maximum Transmission for Diesel Truck для автоматических трансмиссий – это инновационный двухкомпонентный продукт, который объединил в себе ревитализант 3-го поколения и кондиционер металла. Кондиционер Maximum Transmission for Diesel Truck защищает от износа автоматическую коробку передач (АКП), а также обладает восстановительными свойствами. Средство формирует на рабочих поверхностях металлокерамическое покрытие, благодаря чему восстанавливается геометрия деталей, а также компенсируется износ деталей АКП.

Антифрикционная присадка в трансмиссионное масло Getriebeoil-Additiv с дисульфидом молибдена предназначена для механических КП и дифференциалов. Она существенно снижает износ и температуру в зонах трения, обеспечивает плавное и тихое переключение, уменьшает нагрев и повышает срок службы агрегатов.

Средство Gear Protect предназначено для защиты механических КП, дифференциалов и раздаточных коробок. Данное средство содержит мелкодисперсный дисульфид молибдена и, как заявляет производитель, снижает трение и износ, шум при работе, повышает плавность переключения передач и сохраняет стабильность защитных свойств до 100 000 км пробега.

Российскими аналогами препарата Nanoprof Motor Refit KFZ являются добавки «Эконовит», «Поливит», «Цетил», дисперсионная фаза которых состоит из композиции нанопорошков графита, оксида кремния и оксида алюминия. В России и странах бывшего СССР производят добавки в масло в виде суспензии высокодисперсных порошков мягких металлов (Cu, Pb, Sn, Ag, Zn, Au) и их сплавов: Кластер, РиМЕТ, Ресурс-Дизель, Repom, СУРМ, НИКА, УРАЛ, Сомет, ВелАП, Стимул-1, МПП ИГСХА-ТС [10].

Наряду с порошками металлов и сплавов в качестве активных компонентов смазочной среды часто используют природные минералы. Примерами таких препаратов, произведенных в России и содержащих слоистые гидросиликаты магния (серпентины), являются: РВС, НИОД, АРТ, ТСК-М, СУПРОТЕК, СУПРОТЕК ЛЮКС 100, Живой металл, RUTEC-teanimator, МЕГАФОРС, ЭДИАЛ, РВД, ХАДО, ТРИБО, SUPRO, Motor doctor. На основе тонкодисперсных порошков природных минералов НПО «Руспромремонт» разработало и наладило производство за рубежом следующих трибопрепаратов: RVS-metaryzer, METARIZER EX, Metallion Power chip P250, Metarizer professional service в Японии, «РВС –

Голубой нефрит» в Китае, TFT во Вьетнаме, REWITEC в Германии, RVS-Тес ОУ в Финляндии, RESTAL в Швеции [10].

Среди комплексных трибопрепаратов на основе серпентинов и органических добавок известна антифрикционная ресурсовосстанавливающая композиция (АРВК), в состав которой введен трибополимеробразующий препарат ЭФ-357 [10].

Анализ литературных источников [11–15] и результатов предварительных экспериментов позволил выделить относительно новый и перспективный класс добавок в масло – твердофазные добавки. Сравнив технологии получения наноразмерных порошков, был выбран метод плазменной перекомденсации, основанный на испарении крупнодисперсного порошка в плазменном потоке с температурой 5000–8000 К и конденсации пара до частиц требуемого размера. С помощью метода плазменной перекомденсации в условиях ОП «ЛАБОРАТОРИЯ №33» ФГУП «ГНИИХТЭОС» синтезированы следующие НРП дисперсностью 0,01–0,03 мкм:

а) однокомпонентные – оловянная бронза БрОЗЦ7С5 ГОСТ 613-79 (Бр);

б) двухкомпонентные – бронза+фторопласт (Бр-Фт), бронза+нитрид бора (Бр-ВН), бронза+фосфор (Бр-Р), бронза+оксид алюминия (Бр-К).

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Программа проведения экспериментальных исследований предусматривала три этапа:

1) лабораторные исследования;

а) трибологические испытания смазочных материалов на машине трения, моделирующие условия работы зубчатых колес тракторной трансмиссии;

– определение антифрикционных и противозносных свойств;

– определение нагрузочной способности и времени до возникновения заедания образцов;

– оценка способности экспериментальных смазочных композиций снижать питтинг (определение контактно-усталостного ресурса);

б) исследование микрогеометрии и рельефа поверхностей трения образцов;

в) рентгенофазовый анализ образцов трения;

г) термодинамический анализ модельных твердофазных и гетерофазных химических реакций;

2) стендовые испытания капитально отремонтированных ведущих мостов тракторов;

3) эксплуатационные испытания добавки в трансмиссионное масло на тракторах.

Исследование трибологических свойств смазочных композиций, приготовленных на основе

трансмиссионного масла ТМ-3–18 (ТАП-15В ГОСТ 23652–79) и наноразмерных порошкообразных добавок, проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме «ролик–ролик». В качестве добавок к базовому маслу ТМ-3–18 применяли следующие одно- и двухкомпонентные НРП дисперсностью 0,01–0,03 мкм: оловянной бронзы БрОЗЦ7С5 ГОСТ 613-79 (Бр), бронзы с фторопластом (Бр-Фт), бронзы с нитридом бора (Бр-ВН), бронзы с фосфором (Бр-Р), бронзы с оксидом алюминия (Бр-К). Оптимальную концентрацию НРП в трансмиссионном масле определяли по результатам полного факторного эксперимента. В качестве параметра оптимизации выбран обобщенный коэффициент  $K_{об} = f_{mp} \cdot U \cdot t$ , минимальное значение которого соответствует наилучшим трибологическим показателям. Здесь  $f_{mp}$  – максимальное значение коэффициента трения после стабилизации момента трения;  $U$  – износ за время эксперимента, г·10<sup>-4</sup>;  $t$  – температура в масляной ванне, °С. Варьируемыми факторами, влияющими на процесс трения, являлись концентрации ингредиентов добавки НРП в масле. Оптимальная концентрация НРП в масле составила 0,2 масс.% [16]. Однородную суспензию получали при добавлении НРП и олеиновой кислоты в масло ТАП-15В с последующей обработкой ультразвуковым диспергатором, питаемым от генератора УЗГИ-05 при частоте 22 кГц в течение 15 мин.

Экспериментальные образцы – ролики – были изготовлены из стали 20ХНЗА ГОСТ 4543-71, применяемой при производстве тяжело нагруженных зубчатых колес тракторных трансмиссий. Наружный диаметр роликов – 35 мм, ширина верхнего образца – 10, нижнего – 12 мм. В процессе изготовления образцы подвергались цементации на глубину 1,0–1,5 мм, объемной закалке до НRC 58–62 и шлифованию. Шероховатость поверхностей трения образцов после шлифования составляла  $R_a = 0,8–1,0$  мкм.

Перед началом экспериментов ролики прирабатывали на масле ТМ-3–18 при частоте вращения нижнего образца  $n_1 = 8,3$  с<sup>-1</sup> и увеличении нагрузки на образцы от 0 до 1200 Н ступенями по 100 Н. Продолжительность приработки на каждой нагрузочной ступени составляла 30 мин. Критериями окончания приработки служили стабилизация момента трения при максимальной нагрузке  $P = 1200$  Н и получение полного контакта по ширине образцов. После окончания приработки ролики обезжиривали в ацетоне, высушивали на воздухе и взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,1 мг.

Влияние добавок НРП на антифрикционные и противозносные свойства масла изучали при

следующих параметрах режима: нагрузка на образцы  $P = 1,2$  кН; частота вращения нижнего образца  $n_1 = 8,3$  с<sup>-1</sup>; относительная величина проскальзывания в контакте  $\lambda = 10\%$ ; продолжительность каждого эксперимента  $t = 3$  ч. Антифрикционные свойства устанавливали по изменению момента трения и температуры масла. Величина момента трения измерялась индуктивным датчиком машины трения и фиксировалась самопишущим потенциометром КСП-2. Определение температуры в объеме масляной ванны осуществляли с помощью хромель-копелевой термопары типа L ГОСТ Р 8.585-2001 и потенциометра типа КСП-2. Износ образцов за время испытания определяли весовым методом на аналитических весах ВЛА-200-М.

Для определения нагрузочной способности граничных смазочных пленок и времени до заедания использовали образцы трения, применяемые для оценки антифрикционных и противозносных свойств смазочных материалов. Эксперимент проводили при частоте вращения вала нижнего образца  $n = 8,3$  с<sup>-1</sup>, относительной величине проскальзывания  $\lambda = 10\%$  и повышении нагрузки ступенями по 0,1 кН через каждые 5 мин до возникновения схватывания, определяемого по резкому увеличению момента трения и характерному шуму. Начальная нагрузка, равная 1,15 кН, определялась экспериментально, исходя из значения нагрузки, исключающей интенсивное схватывание образцов. Для создания граничной смазочной пленки на образцах в начале эксперимента к вращающимся роликам подвели фетр, смоченный испытываемым смазочным материалом. Во время эксперимента регистрировали момент трения, величину нагрузки и время до возникновения заедания образцов. Трибологические свойства смазочных композиций оценивали при трехкратной повторяемости экспериментов.

Наряду с высоким уровнем антифрикционных и противозадирных свойств трансмиссионное масло должно обладать специфической способностью – снижать усталостное изнашивание рабочих поверхностей зубьев. Для оценки влияния смазочной среды на контактную выносливость материала образцов исследовали экспериментальные смазочные составы на основе масла ТМ-3-18 с добавками НРП оловянной бронзы. Материал образцов трения, их размеры, шероховатость и твердость были аналогичны применяемым для исследования антифрикционных и антизадирных свойств смазочных композиций. Образцы трения приработывали при частоте вращения нижнего вала машины трения  $n_1 = 16,7$  с<sup>-1</sup>, относительной величине проскальзывания в контакте  $\lambda = 10\%$  и ступенчатом

повышении нагрузки от 0 до 1,9 кН через 0,27 кН. Время работы на каждой ступени – 30 мин. Смазочной средой для образцов во время приработки служило масло ТМ-3-18.

Параметры режима испытаний выбирали близкими к условиям работы высоконагруженных зубчатых колес тракторных трансмиссий: частота вращения вала нижнего образца  $n_1 = 16,7$  с<sup>-1</sup>, суммарная скорость качения роликов  $v_{\Sigma k} = 3,5$  м/с, относительная величина проскальзывания  $\lambda = 10\%$ , нормальная нагрузка на образцы  $P = 1,9$  кН. Величину максимальных нормальных контактных напряжений для линейного контакта роликов определяли по уравнению:

$$\sigma_{z_{\max}} = 199,38 \cdot \left[ \frac{P}{l} \left( \frac{2}{d} + \frac{2}{D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где  $P$  – нормальная нагрузка на образцы, Н;  $l$  – длина полоски контакта, мм;  $d$  – диаметр образца, мм;  $D$  – диаметр контртела, мм. В экспериментальных условиях величина нормальных контактных напряжений составляла:

$$\sigma_{z_{\max}} = 199,38 \cdot \left[ \frac{1900}{10} \left( \frac{2}{35} + \frac{2}{35} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = 928 \text{ МПа.}$$

С целью оценки параметров функции распределения контактно-усталостного ресурса на заданном уровне напряжения определяли число экспериментальных образцов  $n$ . Исходными данными служили: вид закона распределения контактно-усталостного ресурса образцов (нормальный), доверительная вероятность  $q = 0,9$  и предельная относительная ошибка оценки контактно-усталостного ресурса  $\varepsilon = 0,1$ . При этом количество образцов составило 18 шт. Уровень контактной выносливости оценивали по числу циклов до появления на дорожке качения образцов, ямок выкрашивания, что сопровождалось увеличением момента трения и появлением шума.

Для изучения процессов, происходящих в зоне контакта трущихся деталей под действием добавок НРП, были исследованы рельеф и микрогеометрия поверхностей трения образцов. Рельеф поверхностей изучали с помощью микроскопа МБИ-15-У42. Величину шероховатости роликов, испытанных при наличии масла ТМ-3-18 и экспериментальных смазочных композиций ТМ-3-18+НРП, измеряли контактным методом на профилографе завода «Калибр» мод. 251.

Определение фазового состава продуктов трибохимических превращений, получаемых в зоне фрикционного контакта, проводили методом рентгенофазового анализа на дифрактометре «Дрон-3,0». При исследовании применяли анод

Cu-K $\alpha$ , обеспечивающий K $\alpha$ -рентгеновское излучение с длиной волны  $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$  при напряжении на рентгеновской трубке 30 кВ. Регистрация отраженных лучей проводилась электронно-вычислительным устройством ЭВУ-1-4 с записью на диаграммной ленте. Анализ данных проводили сопоставлением рентгенограмм исследуемого вещества с эталонными рентгенограммами. Исследовали образцы, вырезанные из роликов, не подвергавшихся испытанию (исходные образцы), а также из роликов, испытанных на машине трения в условиях смазки ТМ-3-18+НПП Бр-К.

На основании результатов лабораторных исследований была выбрана наиболее эффективная добавка НПП к трансмиссионному маслу – Бр-К, которая в дальнейшем испытывалась в стендовых условиях. Исследование противоизносных свойств смазочной композиции ТМ-3-18+НПП Бр-К и стандартного масла ТМ-3-18 проводили на капитально отремонтированных ведущих мостах трактора К-701 с помощью стенда КИ-17917-ГОСНИТИ. Эффективность смазочных материалов оценивали по величине линейного износа и содержанию железа в пробах масла. Измерение длины общей нормали солнечных шестерен и сателлитов конечных передач ведущих мостов проводили нормалеммером БВ-5045 ГОСТ 7760-81 с точностью до 0,002 мм. Содержание «железа» в пробах масла определяли по ГОСТ 20759-90 с помощью фотоэлектрического стилометра МФС-3.

Сравнительные эксплуатационные испытания масла ТМ-3-18 ГОСТ 23652-79 и смазочной композиции ТМ-3-18+НПП Бр-К, показавшие во время стендовых испытаний высокие противоизносные свойства, проводили на 10 сельскохозяйственных тракторах «БЕЛАРУС» 80.1 по плану [NUT], в течение 2500 моточасов. Согласно этому плану, одновременно испытывали  $N$  объектов. Отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливали и не заменяли новыми или отремонтированными, а испытания прекращали по истечении наработки  $T$  для каждого не отказавшего объекта. Уровень нагрузки в подконтрольной группе тракторов обеспечивали за счет идентичности эксплуатационных факторов. Тракторы работали в одинаковых природно-климатических условиях, выполняли аналогичные виды сельскохозяйственных операций (посев, культивация, транспортные работы) на оптимальных скоростях движения, в составе одинаковых машинно-тракторных агрегатов.

Число машин в подконтрольной группе определяли по уравнению:

$$N = \left( \frac{r}{\Phi_0 \left( \frac{\chi - 1}{\nu} \right)} \right), \quad (2)$$

где  $\chi = T_u/T_{cp}$  – относительная продолжительность испытаний;  $T_u$  – продолжительность испытаний, моточас;  $T_{cp}$  – средний ресурс агрегатов, моточас;  $\Phi_0(\chi-1/\nu)$  – центрированная и нормированная функция нормального распределения ресурсов агрегатов.

Исходными данными для расчета служили: доверительная вероятность  $q = 0,9$ ; предельная относительная ошибка оценки ресурса  $\varepsilon = 0,15$ ; коэффициент вариации распределения ресурса  $\nu = 0,2$ ; вид закона распределения ресурса агрегатов – нормальный. Определив прогнозируемое число отказов  $r = 5$  и учитывая относительную продолжительность испытаний  $\chi = 1$ , из уравнения (2) нашли необходимый объем подконтрольной группы тракторов:

$$N = \left( \frac{5}{\Phi_0 \left( \frac{1-1}{0,2} \right)} \right) = 10.$$

В картеры коробок передач и задних мостов пяти тракторов подконтрольной группы заправляли стандартное масло ТАП-15В, а в картеры других пяти – экспериментальное ТАП-15В+НПП Бр-К. До испытания и через каждые 480–500 моточасов наработки контролировали суммарный угловой зазор в механизмах трансмиссии. Измерение угловых зазоров на правой и левой полуосях заднего моста проводили с помощью люфтомера КИ-4813 и приспособления ОПР-484-20 при включенной IV передаче.

Уровень эксплуатационных свойств смазочных материалов оценивали по скорости изменения суммарного углового зазора, которую определяли по уравнению:

$$J = (S_k - S_n)/\tau, \quad (3)$$

где  $S_k$  – суммарный угловой зазор в момент контроля, мин;  $S_n$  – суммарный угловой зазор в начале испытания, мин;  $\tau$  – интервал наработки, мото час.

Обработку результатов всех экспериментов проводили методами математической статистики с использованием ЭВМ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты трибологических испытаний (рис. 1) показывают, что введение любого из исследуемых НПП в базовое масло приводит к повышению его антифрикционных свойств. Характер изменения кривых момента трения идентичен для различных составов смазочной среды, но в то же время величины моментов трения заметно отличаются. При смазке образцов

маслом ТМ-3-18 момент трения после стабилизации составил 1,75 Н·м и не изменялся в течение всего эксперимента. Добавление в базовое масло НРП Бр-Р, Бр-ВН, Бр-Фт привело к снижению момента трения на 3, 6 и 9% соответственно. Наилучшие результаты получены при испытании смазочных композиций с добавками НРП Бр и Бр-К. При смазке образцов маслом ТМ-3-18 с добавками НРП Бр и Бр-К момент трения через 0,5 ч составил 1,52 и 1,5 Н·м соответственно и за время испытания уменьшился до 1,51 и 1,49 Н·м, что на 16 и 17% меньше, чем при смазке стандартным маслом.

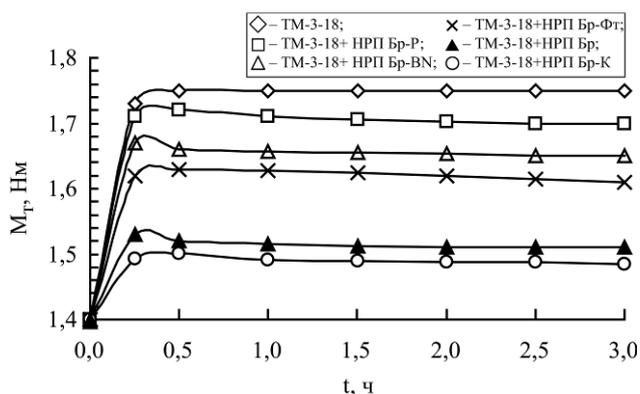


Рис. 1. Изменение момента трения  $M_t$  за время  $t$  при испытании смазочных материалов.

Изменение температуры смазочной среды является отражением тепловых процессов, происходящих на поверхностях трения. Анализ результатов (табл. 1) показывает, что введение в базовое масло НРП Бр-Р, Бр-ВН, Бр-Фт, Бр, Бр-К способствует снижению температуры смазочной среды в среднем на 14, 17, 22, 29 и 37% соответственно.

Таблица 1. Результаты испытания масла ТМ-3-18 с добавками НРП оловянной бронзы

Смазочная среда	Момент трения, Н·м	Температура, °С
ТМ-3-18	1,75	89
ТМ-3-18+НРП Бр-Р	1,7	78
ТМ-3-18+НРП Бр-ВН	1,65	76
ТМ-3-18+НРП Бр-Фт	1,61	73
ТМ-3-18+НРП Бр	1,51	69
ТМ-3-18+НРП Бр-К	1,49	65

Улучшение антифрикционных свойств масла ТМ-3-18 при введении исследуемых добавок НРП сопровождалось значительным повышением противоизносных свойств. Из диаграммы, представленной на рис. 2, видно, что введение любого исследуемого НРП оловянной бронзы значительно улучшает противоизносные свойства базового масла ТМ-3-18. Наилучшими противоизносными свойствами обладает двухкомпонентный НРП оловянной бронзы с оксидом алюминия Бр-К, применение которого способ-

ствует снижению износа в 2,5 раза по сравнению с износом образцов, смазываемых стандартным маслом.

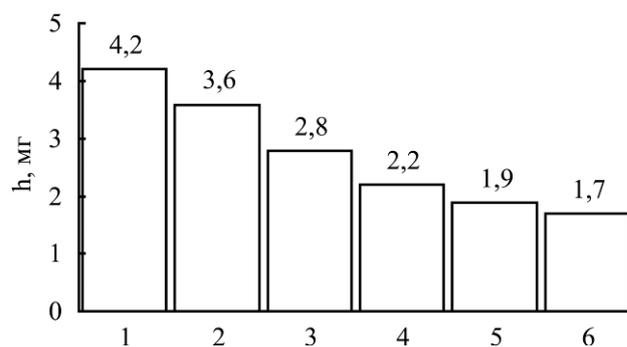


Рис. 2. Износ роликов  $h$ , испытанных на масле: 1 – ТМ-3-18; 2 – ТМ-3-18+НРП Бр-Р; 3 – ТМ-3-18+НРП Бр-ВН; 4 – ТМ-3-18+НРП Бр-Фт; 5 – ТМ-3-18+НРП Бр; 6 – ТМ-3-18+НРП Бр-К.

Определяя нагрузочную способность и время до возникновения заедания образцов, мы получили кривые, характеризующие антизадириные свойства граничных смазочных слоев, образованных добавками (рис. 3). Введение добавок одно- и двухкомпонентных НРП бронзы в трансмиссионное масло ТМ-3-18 во всех случаях повышает несущую способность смазочных слоев. Наилучшими противозадириными свойствами обладает смазочный состав ТМ-3-18+Бр-К, который по сравнению с маслом ТМ-3-18 без добавок НРП повышает критическую нагрузку и время до заедания образцов в среднем на 18 и 33% соответственно.

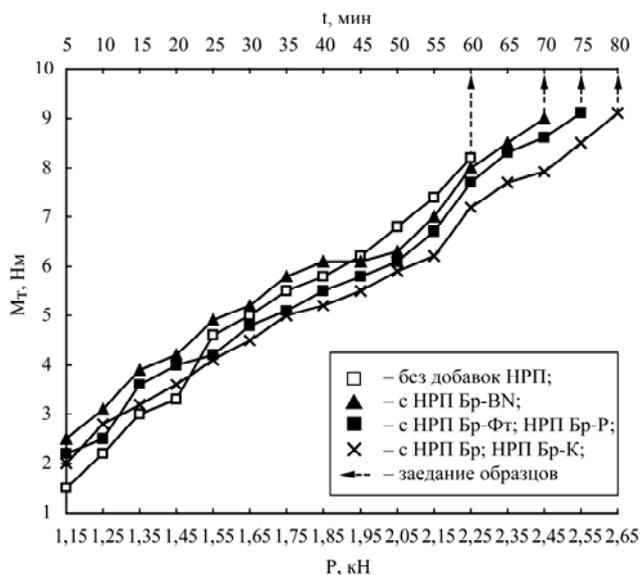
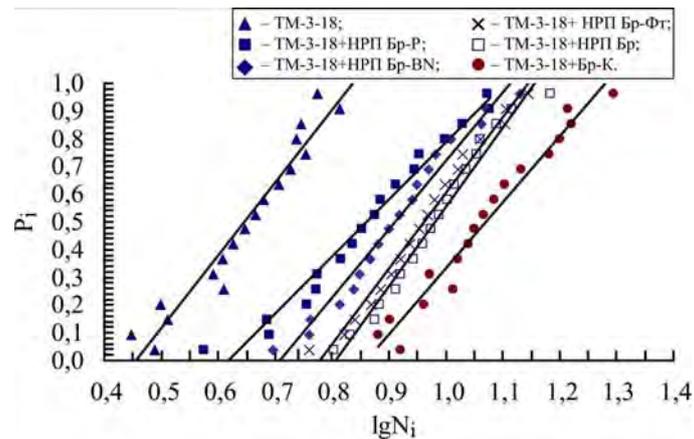
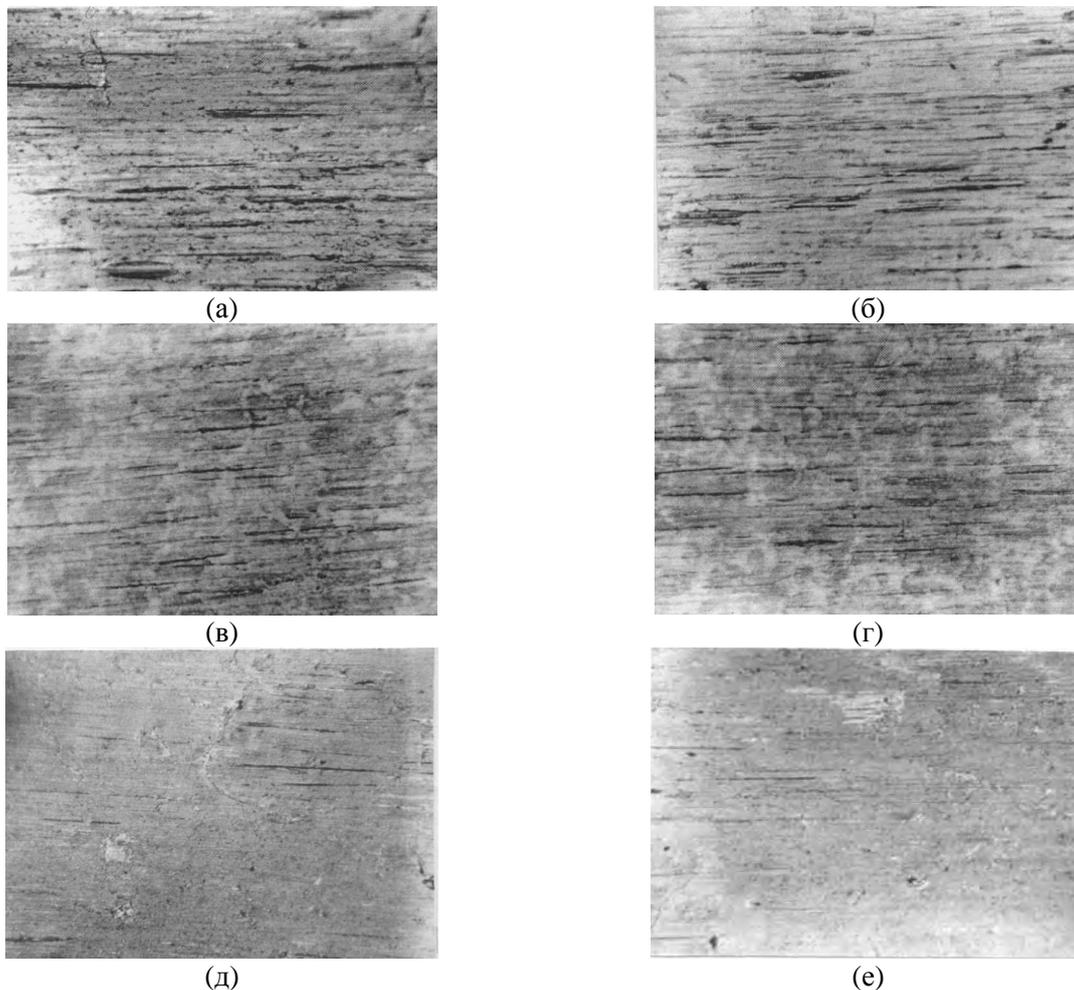


Рис. 3. Зависимость момента трения  $M_t$  от нагрузки  $P$  в паре трения «ролик – ролик» для масла ТМ-3-18.

Анализ результатов испытаний на контактную усталость материала роликов показал (рис. 4), что математическое ожидание логарифма числа циклов до разрушения образцов  $\lg N_i$  при смазке маслом ТМ-3-18 с добавками НРП оловянной



**Рис. 4.** Графики функций распределения  $P_i$  контактно-усталостного ресурса  $\lg N_i$  образцов из стали 20ХН3А при  $\sigma_{z \max} = 928$  МПа и смазке маслом ТМ-3-18 с добавками НРП.



**Рис. 5.** Поверхности трения образцов, испытанных на масле ( $\times 300$ ): (а) – ТМ-3-18; (б) – ТМ-3-18+НРП Бр-Р; (в) – ТМ-3-18+НРП Бр-ВН; (г) – ТМ-3-18+НРП Бр-Фт; (д) – ТМ-3-18+НРП Бр; (е) – ТМ-3-18+НРП Бр-К.

бронзы существенно повышается по сравнению со стандартным маслом. Введение в базовое масло НРП Бр-Р, Бр-ВН, Бр-Фт, Бр во всех случаях вызывает увеличение контактной долговечности  $\lg N_i$  образцов в среднем на 33, 40, 49 и 52% соответственно. Максимальное значение числа циклов до начала выкрашивания  $\lg N_i = 1,07$  отмечено при смазке роликов маслом ТМ-3-18+НРП Бр-К, что превышает соответ-

ствующий показатель контактной выносливости образцов, смазываемых стандартным маслом, в 1,66 раза.

Изучение рельефа рабочих поверхностей образцов, испытанных при качении с 10% проскальзыванием в условиях смазки маслом с добавками НРП, показало положительное влияние добавок на процессы в зоне контакта. На поверхности трения образца, смазываемого стандартным маслом ТМ-3-18 (рис. 5а), видны

дефекты в виде множества рисок и следов пластического деформирования металла, что подтверждает наличие граничного трения во время проведения эксперимента. В отличие от этой поверхности, на дорожках трения образцов, испытанных на масле с добавками НРП Бр-Фт, Бр-ВН, Бр (рис. 5в–д), наблюдается уменьшение количества дефектов. Протяженность и ширина рисок уменьшаются, а сами риски приобретают менее четкие очертания, что подтверждает благоприятный режим работы фрикционной пары. Сравнение фотографий поверхностей трения показывает, что наиболее однородный микро-рельеф с минимальным количеством дефектов наблюдается у образца, испытанного на масле ТМ-3-18+НРП Бр-К (рис. 5е). Светлые фрагменты на рис. 5в–е, вероятно, указывают на формирование пленки, состоящей из элементов НРП.

Измерение шероховатости образцов трения показало существенное изменение микрогеометрии рабочих поверхностей, смазываемых маслом с добавками НРП, по сравнению с поверхностями образцов, смазываемых стандартным маслом. Величина среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  рабочих поверхностей роликов, испытанных на масле ТМ-3-18+НРП Бр-К, равна 0,09–0,20 мкм, а роликов, смазываемых стандартным маслом ТМ-3-18, – 0,25–0,37 мкм, что в 1,9–2,8 раза меньше.

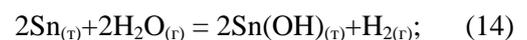
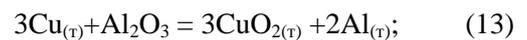
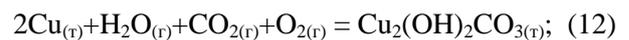
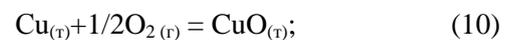
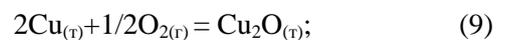
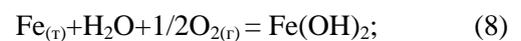
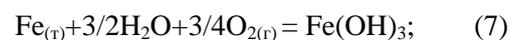
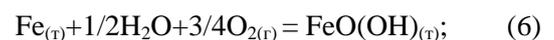
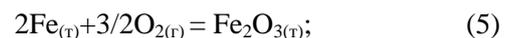
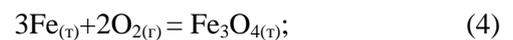
Визуальный осмотр поверхностей трения роликов, смазываемых во время эксперимента маслом с добавками НРП, показал наличие темной пленки, отсутствующей у образцов не подвергавшихся трибологическим испытаниям. С целью определения изменений, происходящих в поверхностном слое образцов трения при смазке их маслом ТМ-3-18+НРП Бр-К, проводили термодинамический анализ модельных твердофазных и гетерофазных реакций, способных протекать в системе Fe-Cu-Sn-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в присутствии кислорода воздуха и водяных паров.

В соответствии с работами М.Д. Генкина, Н.Ф. Кузьмина, Ю.А. Мишарина, Ю.Н. Дроздова [17, 18, 19] максимальная температура в зоне контакта зубчатых передач оценивается суммой объемной температуры зуба, средней температуры на перемещающейся полоске контакта и температурной вспышки. Объемная температура зуба определяется экспериментально с помощью термопары, а средняя температура на перемещающейся полоске контакта и величина температурной вспышки вследствие технических трудностей определяются расчетным путем или косвенными методами. Одним из таких методов является металлографический анализ, результаты которого свидетельствуют о возникновении высоких температур при трении, достаточных

для превращения  $\alpha$ -Fe  $\rightarrow$   $\gamma$ -Fe [20]. Принципиально отличным типом структур, образующихся в результате трансформации поверхности твердого тела, являются так называемые белые слои, толщина которых может достигать сотен мкм. Образование этих структур, как правило, связано со значительным повышением температуры в зоне трения [21]. В теплонагруженных узлах трения температура в контактных зонах может достигать 1000°C и выше, что приводит к расплавлению поверхностных слоев [22].

Для определения максимальной температуры в контакте зубчатых колес нами разработана программа, ориентированная на ЭВМ IBM PC. Программа позволяет установить зависимость объемной температуры зубчатого колеса, средней температуры на поверхности трения, температурной вспышки и максимальной температуры от комплекса факторов, входящих в уравнения для определения этих характеристик. Расчеты показали, что максимальная температура в зоне контакта зубьев находится в интервале 400–560°C.

При расчетах модельных химических реакций в системе Fe-Cu-Sn-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> учитывали, что температура поверхностного слоя вследствие локального нагрева при трении может увеличиваться до 560°C, а в условиях стационарного процесса трения протекают равновесные химические реакции. Возможность взаимодействия добавки НРП с легирующими металлами материала роликов во внимание не принимали. Рассматривали следующие наиболее характерные реакции:



Для указанных реакций рассчитано изменение свободной энергии Гиббса в интервале температур 200–1000 К. Результаты расчетов для выбранных реакций приведены на рис. 6. Наиболее вероятными являются реакции: окисления

железа (4), (5), окисления меди (9), (10), образования гидроксида железа (6), окисления меди с восстановлением алюминия (13).

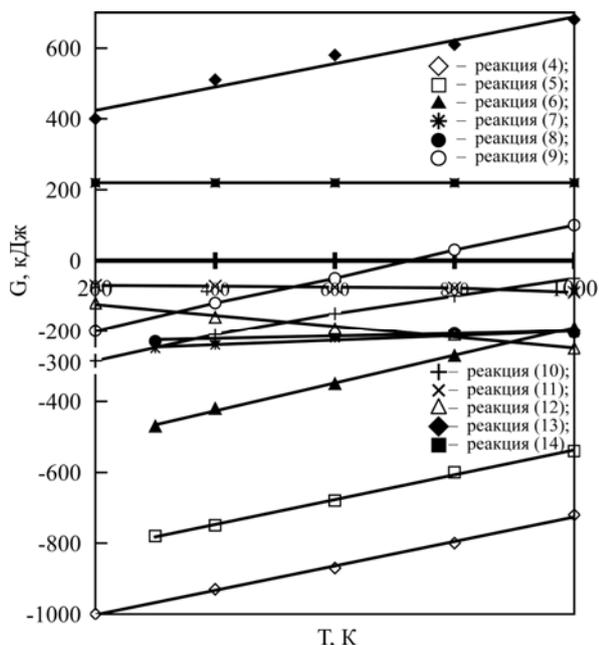


Рис. 6. Изменение свободной энергии Гиббса  $\Delta G$  для реакций взаимодействия в системе Fe-Cu-Sn-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

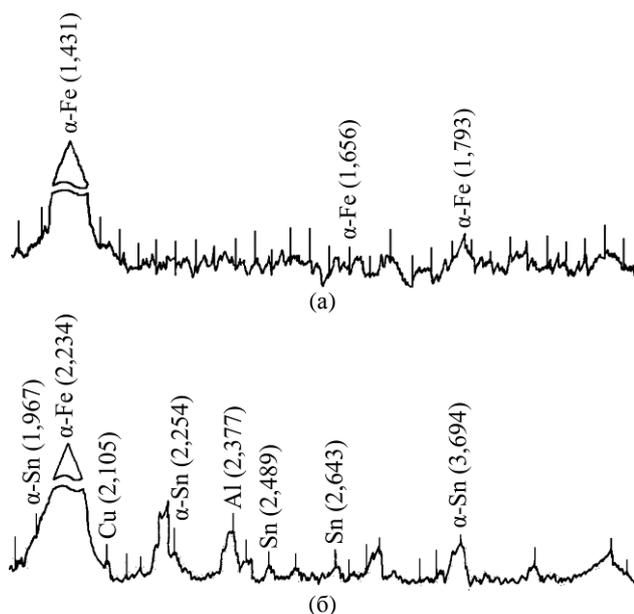


Рис. 7. Рентгенограммы образцов трения: (а) – ролик до испытания (сталь 20ХНЗА); (б) – ролик после испытания на масле ТМ-3-18+НРП Бр-К.

Результаты рентгенофазового анализа образцов, вырезанных из роликов, представлены на рис. 7. На рентгенограмме исходного образца (рис. 7а) видны пики с межплоскостными расстояниями 1,431; 1,656; 1,793 Å, которые соответствуют материалу ролика – стали 20ХНЗА. Наличие пиков  $\alpha$ -Sn (1,967; 2,254; 3,694), Sn (2,489; 2,643), Cu (2,105), Al (2,377) на дифрактограмме образца, испытанного на масле ТМ-3-118+НРП Бр-К (рис. 7б), позволило иден-

тифицировать элементы НРП Бр-К. Таким образом, результаты рентгенофазового анализа свидетельствуют о наличии на контактной поверхности испытанного ролика пленки, состоящей из элементов добавляемого в масло НРП. Толщину пленки, сформированной НРП Бр-К, определяли по следующему уравнению:

$$t = \frac{\ln I_0 \cdot \sin \Theta}{I \cdot -2\mu}, \quad (17)$$

где  $I$  – интенсивность отражения с покрытием;  $I_0$  – интенсивность отражения без покрытия;  $\Theta$  – дифракционный угол аналитического рефлекса;  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления;  $t$  – толщина покрытия.

Результаты расчета показали, что толщина сформированной пленки составила 2,2 мкм.

Результаты стендовых испытаний показали, что средний линейный износ зубчатых колес, работающих в смазочной среде ТМ-3-18+НРП Бр-К, в 1,47 раза меньше, чем на стандартном масле. Данные микрометража зубчатых колес хорошо согласуются с результатами спектрального анализа проб масла, представленными на рис. 8. Анализ результатов показывает, что в условиях смазки деталей бортовых редукторов маслом ТМ-3-18+НРП Бр-К в течение 200 ч испытаний содержание железа в пробах масла на 42% меньше, чем при смазке стандартным маслом.

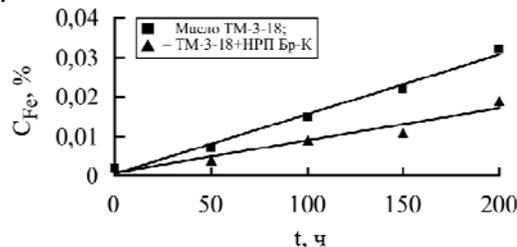


Рис. 8. Изменение концентрации железа в масле  $C_{Fe}$  при испытаниях ведущих мостов.

Результаты изменения суммарного углового зазора в силовых передачах тракторов, работающих в условиях рядовой эксплуатации на стандартном и экспериментальном маслах, приведены в табл. 2. Анализ результатов показывает, что средняя скорость изменения суммарного углового зазора, характеризующая скорость изнашивания деталей трансмиссии при смазке маслом ТМ-3-18 с добавкой НРП Бр-К, была на 30–45% ниже, чем при смазке стандартным маслом.

По данным эксплуатационных испытаний проведено прогнозирование остаточного ресурса агрегатов трансмиссии тракторов «БЕЛАРУС» 80.1, работающих на экспериментальной смазочной композиции.

Остаточный ресурс коробок передач и задних мостов определяли по формуле (18):

Таблица 2. Изменение суммарного углового зазора в механизмах трансмиссии тракторов «БЕЛАРУС» 80.1

Наработка тракторов, моточас	Смазочный материал	Суммарный боковой зазор, мин	Средняя скорость изменения бокового зазора, мин/моточас	Смазочный материал	Суммарный боковой зазор, мин	Средняя скорость изменения бокового зазора, мин/моточас
1	2	3	4	5	6	7
0	ТМ-3-18	128	0,044	ТМ-3-18+ НРП Бр-К	97	0,031
500		132			107	
1000		145			109	
1500		199			154	
2000		270			170	
2500		316			208	
0	ТМ-3-18	114	0,042	ТМ-3-18+ НРП Бр-К	153	0,034
500		132			161	
1000		138			172	
1500		164			196	
2000		221			217	
2500		269			239	
0	ТМ-3-18	58	0,040	ТМ-3-18+ НРП Бр-К	115	0,032
500		72			127	
1000		89			148	
1500		102			156	
2000		166			180	
2500		200			227	
0	ТМ-3-18	104	0,043	ТМ-3-18+ НРП Бр-К	101	0,035
500		118			105	
1000		141			134	
1500		163			156	
2000		200			198	
2500		257			216	
0	ТМ-3-18	68	0,045	ТМ-3-18+ НРП Бр-К	157	0,031
500		82			168	
1000		103			174	
1500		128			194	
2000		185			243	
2500		224			281	

$$t_{осм} = \left( \frac{1}{\left( \frac{u_2}{u_1} \right)^{1/\alpha} - 1} \right) \cdot \left[ t_{1-2} \cdot \left( \left( \frac{u_n}{u_2} \right)^{1/\alpha} - 1 \right) \right], \quad (18)$$

где  $u_n$  – предельное изменение контролируемого параметра, мин;  $u_1$  – изменение параметра состояния, установленное при первом замере, мин;  $u_2$  – изменение параметра состояния, установленное при втором замере, мин;  $t_{1-2}$  – наработка между двумя замерами, моточас;  $\alpha$  – показатель степени аппроксимирующей функции изменения контролируемого параметра,  $\alpha = 1,5$ .

Для агрегатов, смазываемых во время испытаний стандартным маслом ТАП-15В, остаточный ресурс составил:

$$t_{осм} = \left( \frac{1}{\left( \frac{200}{58} \right)^{1/1,5} - 1} \right) \cdot \left[ 2500 \cdot \left( \left( \frac{360}{200} \right)^{1/1,5} - 1 \right) \right] = 942 \text{ моточаса,}$$

а для агрегатов смазываемых ТАП-15В+НРП Бр-К, –

$$t_{осм} = \left( \frac{1}{\left( \frac{298}{210} \right)^{1/1,5} - 1} \right) \cdot \left[ 2500 \cdot \left( \left( \frac{360}{298} \right)^{1/1,5} - 1 \right) \right] = 1295 \text{ моточасов.}$$

Расчеты показывают, что долговечность агрегатов, смазываемых маслом ТАП-15В+НРП Бр-К, увеличится на 37% по сравнению с агрегатами, работающими на стандартном масле.

Улучшение смазочных свойств масла ТМ-3-18 при добавлении в него НРП, по нашему предположению, можно объяснить формированием на поверхностях трения пленки определенного строения с высокими трибологическими характеристиками. Сформированная пленка состоит из твердых частиц оксида алюминия, распределенных среди пластичной бронзы. Такое строение пленки отвечает двум условиям: давление передается зернам оксида алюминия, армирующим ее, а пластичность бронзы, являющейся

связующим элементом, позволяет избежать местных избытков давления. Наноразмерные частицы присадки заполняют микровпадины и залечивают поверхностные дефекты, тем самым увеличивая площадь контакта. Это вызывает уменьшение удельного давления и пластических деформаций микровыступов контактирующих поверхностей. Пленка разделяет трущиеся поверхности и препятствует металлическому контакту. Образование пленки вызывает снижение удельной поверхностной энергии и адгезионной составляющей силы трения. Высокие антифрикционные свойства пленки снижают касательные напряжения, возникающие при трении, и вместе с уменьшением доли металлического контакта способствуют увеличению контактной выносливости образцов. Кроме того, свободные частицы присадки образуют несущий смазочный слой более высокой вязкости, что благоприятствует созданию жидкостного режима трения.

### ВЫВОДЫ

1. На основании данных анализа литературных источников установлено, что низкая долговечность агрегатов трансмиссии тракторов обусловлена износом и питингом активных поверхностей зубчатых колес.

2. С помощью метода плазменной переконденсации синтезированы одно- и двухкомпонентные НРП оловянной бронзы дисперсностью 0,01–0,03 мкм для добавления в трансмиссионное масло. Расчетно-экспериментальным методом оптимизированы состав и общая концентрация добавки в масло.

3. В результате сравнительных трибологических испытаний трансмиссионного масла ТАП-15В (ГОСТ 23659–79) и смазочных композиций с добавками НРП (Бр, Бр-Р, Бр-ВН, Бр-Фт, Бр-К) установлен наибольший эффект добавки НРП Бр-К. Введение ее в базовое масло позволило снизить момент трения на 17%, температуру смазочной среды на 37%, износ в 2,5 раза, при этом нагрузка заедания образцов увеличилась на 18%, время до возникновения заедания – на 33%, а контактная выносливость в 1,66 раза.

4. Измерение шероховатости образцов трения показало, что применение добавки НРП Бр-К к трансмиссионному маслу способствует снижению шероховатости в 1,9–2,8 раза. Результаты рентгенофазового анализа поверхностной пленки, сформированной за счет разработанной добавки НРП в трансмиссионное масло, свидетельствуют о наличии в ней меди, олова, алюминия и их оксидов. Толщина пленки составила 2,2 мкм.

5. Применение смазочной композиции ТМ-3-18+НРП Бр-К вместо стандартного масла позволило снизить износ деталей во время стендовых испытаний в 1,47 раза, а в условиях рядовой эксплуатации средняя скорость изнашивания была ниже на 30–45%. Расчет остаточного ресурса показал, что при смазке агрегатов трансмиссии маслом ТМ-3-18 с добавкой НРП Бр-К их долговечность увеличивается на 37%.

6. Результаты проведенных комплексных исследований позволяют рекомендовать для смазывания агрегатов механических трансмиссий тракторов масло ТМ-3-18+НРП Бр-К, которое прошло лабораторные, стендовые и эксплуатационные испытания.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Воронов Е.В. *Сельский механизатор*. 2012, (11), 10–11.
2. Тюпаков К. *АПК: Экономика, управление*. 2012, (1), 60–66.
3. Лачуга Ю.Ф., Кряжков В.М., Шевцов В.Г. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2012, (6), 4–11.
4. Скрынник Е.Б. *Экономика сельского хозяйства России*. 2010, (1), 18–40.
5. Жутов А.Г., Жидков Г.И., Коблов С.П. *Тракторы и сельхозмашины*. 2010, (1), 48–50.
6. Балашов Б.А., Гальпер Р.Р., Гаркави Л.М., Державец Ю.А., и др. *Редукторы энергетических машин*. Л.: Машиностроение, 1985. 232 с.
7. Сафонов В.В., Шишурин С.А., Александров В.А. *Нанотехника*. 2009, (20), 79–80.
8. Сафонов В.В., Добринский Э.К., Буйлов В.Н., Семин А.Г., Митюшкин А.А., Венскайтис В.В. *Смазочная композиция*. РФ пат. 2123030, 1998. Бюл. № 34. 7 с.
9. Сафонов В.В., Азаров А.С., Гороховский А.В., Палагин А.И. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2011, (1), 17–20.
10. Сафонов В.В., Венскайтис В.В., Добринский Э.К., Халов Е.Ю. *Научная жизнь*. 2016, (2), 6–21.
11. Сафонов В.В., Остриков В.В., Шелохвостов В.П., Попов С.Ю. *Наука в Центральной России*. 2014, (7), 42–52.
12. Сафонов В.В., Остриков В.В., Зимин А.Г., Попов С.Ю. *Тракторы и сельхозмашины*. 2014, (5), 42–44.
13. Сафонов В.В., Александров В.А., Азаров А.С., Добринский Э.К. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2008, (2), 8–11.
14. Сафонов В.В., Гороховский А.В., Палагин А.Н., Азаров А.С., и др. *Нанотехника*. 2009, (20), 94–95.
15. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Дудко П.П. *Повышение надежности трибосопряжений: Материалы. Пары трения ДВС. Смазочные композиции*. СПб.: Академия транспорта РФ, 2001. 304 с.
16. Сафонов В.В., Добринский Э.К., Венскайтис В.В., Нестеров А.Л. *Трансмиссионное масло*. РФ пат.

2107090, 1998. Бюл. № 8. 5 с.

17. Коздоба Л.А. *Методы решения нелинейных задач теплопроводности*. М.: Наука, 1975. 228 с.
18. Алексеев Н.М., Блюмен А.В., Браун Э.Д., Броновец М.А., и др. *Справочник по триботехнике. В 3 т. Т.1. Теоретические основы*. М.: Машиностроение, 1989. 400 с.
19. Дроздов Ю.Н., Арчegov В.Г., Смирнов В.И. *Противозадирная стойкость трущихся тел*. М.: Наука, 1981. 139 с.
20. Фролов К.В. *Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения*. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.
21. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. *Механохимические процессы при граничном трении*. М.: Наука, 1972. 170 с.
22. Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д., Буше Н.А., Буяновский И.А., Геккер Ф.Р., Горячева И.Г., Гриб В.В., Демкин Н.Б., Добычин М.Н., Евдокимов Ю.А., Захаров С.М., Кершенбаум В.Я., Лужнов Ю.М., Мамхегов М.А., Михин Н.М., Романова А.Т. *Трение, износ и смазка (трибология и триботехника)*. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.

Поступила 27.04.15  
После доработки 14.09.15

### Summary

Complex pilot studies of the influence of one – and two-component the nanodimensional powdery additives on the operational properties of transmission TM-3-18 oil (GOST 23652-79 TAP-15V) have been conducted. It is established that introduction of nanodimensional powdery additives of tin bronze and of aluminum oxide into the basic oil increases its antifrictional, antiwear, antiwelding properties. It also contributes to the increase in durability of cogwheels of the units of transmission of a tractor limiting a resource.

*Keywords: reliability, between-repairs resource, transmission oil, lubricant composition, wear, nanodimensional powders, tribological properties, friction surface, contact endurance.*